

La vida propia del experimento

Un análisis crítico de la autonomía de la experimentación y su relación con la constitución y la justificación de la evidencia empírica

Autor:

Zuppone, Romina

Tutor:

Cassini, Alejandro

2013

Tesis presentada con el fin de cumplimentar con los requisitos finales para la obtención del título Doctor de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires en Filosofía

Posgrado

TESIS DE DOCTORADO

LA VIDA PROPIA DEL EXPERIMENTO:

UN ANÁLISIS CRÍTICO DE LA AUTONOMÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN Y
SU RELACIÓN CON LA CONSTITUCIÓN Y LA JUSTIFICACIÓN DE LA
EVIDENCIA EMPÍRICA.

(2013)

Romina Zuppone

Director: Alejandro Cassini

Co-director: José Antonio Díez Calzada

Contenido

<i>Agradecimientos</i>	5
<i>Introducción</i>	8
<i>Primera Parte: estado de la cuestión y marco teórico</i>	13
<i>Capítulo I El experimento como objeto de estudio filosófico</i>	14
1.1 El surgimiento de los estudios filosóficos sobre la experimentación	14
1.2 Los resultados experimentales y su valor como evidencia empírica	21
1.3 Las relaciones entre teorías y experimentos	22
<i>Capítulo II Los experimentos en las ciencias naturales</i>	29
2.1 ¿Qué es un experimento?	29
2.2 Tipos de experimentos en ciencias naturales	42
2.3 Tipos de resultados experimentales	50
<i>Segunda parte: la base empírica</i>	54
<i>Capítulo III Los experimentos cuantitativos: Michelson y la velocidad de la luz</i>	55
3.1 Los experimentos cuantitativos	55
3.2 Michelson y la medición de la velocidad de la luz	56
3.2.1 Antecedentes	56
3.2.2 El primer experimento de Michelson	63
3.3 La interpretación de los resultados	68
<i>Capítulo IV Los experimentos atributivos-cualitativos: Newton y la composición de la luz blanca</i>	71
4.1 Los experimentos atributivos-cualitativos	71
4.2 Newton y la composición de la luz blanca	72
4.3 La interpretación de los resultados	83
<i>Capítulo V Los experimentos existenciales: Weber y la detección de ondas de gravedad</i>	92
5.1 Los experimentos existenciales	92
5.2 Las ondas de gravedad	93

5.3	El experimento de Weber.....	98
5.4	Críticas al experimento de Weber.....	101
5.5	La interpretación de los resultados.....	109
<i>Tercera parte: La autonomía de la experimentación y el regreso del experimentador</i> ..		112
<i>Capítulo VI La vida propia del experimento como estrategia filosófica</i>		113
6.1	Introducción	113
6.2	Las <i>muchas vidas</i> del experimento.....	114
6.3	Las motivaciones para la defensa de la <i>c-autonomía</i>	118
6.4	El regreso del experimentador y la vida propia del experimento.....	122
<i>Capítulo VII El regreso del experimentador</i>		128
7.1	¿Cuántas formas hay de <i>regresar</i> ?.....	128
7.2	La reconstrucción de <i>AREr</i>	131
7.3	La reconstrucción de <i>AREg</i>	137
7.4	Conclusión	141
<i>Capítulo VIII La autonomía constitutiva de la evidencia empírica</i>		143
8.1	La autonomía constitutiva.....	143
8.2	La semántica de los resultados experimentales.....	153
8.3	¿Son los resultados experimentales estables o reinterpretables?.....	159
8.4	<i>AREg</i> y <i>c-autonomía</i>	161
<i>Capítulo IX La autonomía respecto de la justificación de la evidencia empírica</i>		164
9.1	La <i>j-autonomía</i> y la epistemología del experimento.....	164
9.2	Evaluación de los <i>outputs</i> obtenidos.....	167
	Intervención	168
	Validación indirecta	169
	Uso de aparatos cuyo funcionamiento esté basado en teorías bien corroboradas	170
	Eliminación de las fuentes de error.....	171
9.3	Evaluación de los <i>datos</i>	173
	<i>Datos</i> que presentan comportamiento nómico.....	173

Confirmación independiente	173
Calibración	177
9.4 Evaluación del <i>e-resultado</i>	179
Variación de las técnicas de análisis estadístico	180
Variación del conjunto de datos a analizar	180
Explicitación del criterio en la selección de los datos a analizar	181
Significación estadística de un efecto y desviación estándar	181
Explicación del <i>e-resultado</i> a partir de una teoría sistemática	183
9.5 Evaluación del <i>t-resultado</i>	184
Utilización de las propiedades de los <i>t-resultados</i>	184
Eliminación de explicaciones alternativas	185
9.6 <i>AREr</i> y <i>j-autonomía</i>	189
<i>Conclusiones</i>	191
<i>Apéndice Replicación, conocimiento tácito y AREr</i>	195
A.1 Reproducción, repetición, replicación: algunas precisiones conceptuales	195
A.2 La replicación de experimentos y el conocimiento tácito	198
A.3 ¿Hemos sobrestimado la replicación?	202
<i>Bibliografía</i>	205

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a la Universidad de Buenos Aires, institución en la que realicé mi formación de grado y en la que realicé la investigación que me condujo a presentar, hoy, esta tesis. Quiero agradecer, además, al Consejo de investigaciones científicas y técnicas (Conicet), gracias al que pude dedicarme exclusivamente a la actividad académica en el período de investigación y de escritura de este trabajo. Quiero agradecer también a la Universidad Nacional de Quilmes, institución en la que me desempeño como profesora, por la libertad, la confianza y por las oportunidades, así como a los integrantes del área de filosofía y a los participantes del grupo de investigación en filosofía de las ciencias del que formo parte, especialmente a Pablo Lorenzano, Christian Carman, Santiago Ginnobili, Lucía Federico y Karina Alleva.

Esta investigación debe muchísimo a mis directores: Alejandro Cassini y José Antonio Díez Calzada. Comenzaré agradeciendo a Alejandro, a quien conocí al cursar filosofía de las ciencias allá por el año 1999 y cuyas clases me llenaron de entusiasmo y renovaron mi curiosidad y mi pasión por la filosofía de las ciencias naturales. Alejandro fue mi supervisor desde entonces y dirigió tanto mi adscripción a la cátedra de filosofía de las ciencias, como mi tesis de licenciatura, como mi investigación doctoral. No podría haber encontrado un director más dedicado e íntegro. Por ello le estoy profundamente agradecida. Continuaré agradeciendo a José Antonio, a quien conocí personalmente cuando expuse un trabajo en la Sociedad de análisis filosófico (Sadaf). Sus preguntas lograron que precisara y revisara mis creencias una y otra vez. José leyó y discutió conmigo mi tesis de licenciatura y por su dedicación, su predisposición y su agudeza, lo invité a co-dirigir mi tesis doctoral, que ha leído, corregido y discutido conmigo en innumerables ocasiones. José representó un impulso valiosísimo en mi vida académica, nutriéndome con un balance de comentarios críticos y de *heurística positiva*. Como si lo anterior no fuese suficiente, influyó en mi desarrollo como persona de un modo en el que, probablemente, él no imagine. Por ambas cosas mi más sincera gratitud y mi reconocimiento.

Y ahora a ambos, en tanto que mis mentores: gracias por creer y confiar en mí.

¿Qué decir de mi mamá? ¿Qué palabras serían suficientes para hacer justicia a todo lo que hizo y sigue haciendo por mí? Seré breve: ¡gracias, mami; estoy en deuda contigo hasta por el agrupamiento de mis moléculas! También se lleva una mención especial mi hermano adorado, ese grandulón que para mí siempre será el niño de corte taza y mirada risueña.

A mis amigos y a mis colegas, por hacer mi vida más bella, por su apoyo y por enseñarme tanto acerca de tantas cosas: Daniela Faggiano, Juliana Udi, Macarena Marey, Nicolás Denino, Ignacio Mastroleo, Federico Vasen, Christian de Ronde, Nahuel Sznajderhaus, Lucía Prieto Castrillo, Adrian Briciu, John Horden, Ljubomir Stevanovic, Aurélien Darbellay, Stefan Reining, David Rey, Carlota Serrahima, Pilar Terrés, Mar Alloza, Gonçalo Santos, Oscar Cabaco, Paco Murcia, Chiara Panizza, Carlos Muñoz, Giovanni Merlo, Albert Solé, Daniele Molinini, Aldo Filomeno, Laura Felling, Adam Sus, Marcelo Perez Quinteros, Laura Londei y Estrella Marzocchi.

Finalmente, quiero destacar el incentivo intelectual que supusieron para mí las estadías en la Universidad de Barcelona en el marco del proyecto *Persp* (Perspectival Thoughts and Facts). Agradezco especialmente al director del proyecto, Manuel García Carpintero, a todos los miembros de *Logos* y muy especialmente a los profesores del master *Aphil* y, en particular a Carl Hofer por sus comentarios a una versión previa del capítulo quinto de este trabajo.

A mi papá.

Introducción

En el segundo párrafo de *Novum Organum*, Bacon afirmaba: “Ni la mano sola ni el espíritu abandonado a sí mismo tienen gran potencia; para realizar la obra se requieren instrumentos y auxilios que tan necesarios son a la inteligencia como a la mano. Y de la misma suerte que los instrumentos físicos aceleran y regulan el movimiento de la mano, los instrumentos intelectuales facilitan o disciplinan el curso del espíritu”. A partir de ese momento inaugural en la historia de la filosofía y de la ciencia, se reivindicó y se alentó el tratamiento de dos conjuntos de problemas en el marco de los estudios metacientíficos: los problemas propios del costado práctico de la investigación científica: la experimentación; y los problemas asociados a la construcción, evaluación y justificación de las teorías científicas. Muchos siglos después, tanto Pierre Duhem como Ernst Mach, desde sus respectivas posiciones filosóficas, reconocían la relevancia de la experimentación como objeto de estudio filosófico. Duhem, por ejemplo, en su célebre obra *La Théorie Physique: son objet, sa structure* (1906), abordaba los aspectos semánticos y epistémicos de la producción del conocimiento experimental. Mientras que Mach, en el capítulo doce de *Erkenntnis und Irrtum: Skizzen zum Psychologie der Forschung* (1905), se detuvo en los problemas del error en la experimentación, más precisamente, en los aspectos metodológicos y epistemológicos de lo que hoy podemos denominar *filosofía de la experimentación*. A partir de las reflexiones de ambos filósofos, dos preguntas centrales para la filosofía del experimento quedaban planteadas:

- (1) ¿Qué es un experimento en física? ¿Cómo se constituye un resultado experimental?
- (2) ¿Qué estrategias pueden emplearse para obtener datos certeros en el contexto de la experimentación?

En el desarrollo posterior de la filosofía de la ciencia, sin embargo, se postergó el tratamiento de ambos problemas, en virtud de razones tanto filosóficas como pragmáticas, tanto históricas como políticas. Y, hacia mediados del siglo veinte, cuando

aquellos pensadores que solemos vincular con la concepción heredada defendían la posibilidad de una base empírica neutral y por lo tanto estable frente al cambio teórico, la corriente historicista contraponía a dicha concepción la tesis de la carga teórica de la observación. En este panorama, el experimento, o bien se concebía como permitiendo el hallazgo de regularidades empíricas y la contrastación de teorías –tal como lo sostenían los exponentes de la concepción heredada (cf. Nagel, 1961; Popper, 1959), o bien se concebía como dependiendo del paradigma vigente, con lo cual era negado tanto su valor como árbitro de las teorías científicas, como su autonomía respecto del conocimiento teórico (cf. Kuhn, 1970), al mismo tiempo que le adjudicaban otras funciones que la concepción heredada había desestimado, como, por ejemplo, la determinación de parámetros y constantes y el desarrollo tecnológico (cf. Kuhn, 1977).

Es a partir de esta tensión que quedaba planteada que la relevancia del tratamiento filosófico de la experimentación comienza a resultar evidente. ¿Cuáles son las funciones del experimento? pregunta Hacking en *Representing and Intervening* (1983), el trabajo que inaugura la filosofía de la experimentación contemporánea. ¿Cuál es la dinámica entre las teorías, los instrumentos de medición y los datos obtenidos en la práctica experimental? prosigue Ackermann en su *Data, Instruments and Theories* (1985). Finalmente, es Allan Franklin (1986) quien recupera las inquietudes machianas y propone una *epistemología del experimento*, intentando explicitar en virtud de qué razones puede aceptarse un resultado experimental, cuáles son las estrategias que permiten eliminar el error en el transcurso de un experimento y que permiten distinguir un resultado correcto de un artefacto. Nuevamente, la experimentación se establecía como un objeto de estudio relevante en la agenda de problemas de la filosofía de las ciencias.

Pero si bien desde entonces las reflexiones acerca de la experimentación, la constitución de la evidencia empírica y la dinámica entre instrumentos, teorías y datos, han aumentado considerablemente, dando como resultado una gran cantidad de artículos, libros y compilaciones sobre el tema, todavía hoy nos encontramos lejos de la consolidación de un programa de investigación que proporcione un tratamiento sistemático de los problemas filosóficos que la experimentación, en las ciencias naturales, suscita. La mayor parte de las investigaciones contemporáneas son estudios de carácter histórico, y por lo tanto, particulares, siendo escasa la producción de

resultados generales que trasciendan el análisis de casos empíricos.¹ Y si bien reconozco la importancia y el valor que el estudio de casos reviste para la filosofía de la ciencia, también entiendo que el propósito de la práctica filosófica no puede circunscribirse a la mera reflexión sobre casos especiales y que es necesario integrarlos en marcos conceptuales de carácter general. Es por ello que uno de los objetivos de este trabajo consiste en proporcionar un marco teórico que permita una comprensión más rica de la experimentación y de sus problemas epistemológicos. Uno de los ejes a partir del cual la discusión en el marco de la filosofía de la experimentación puede articularse es la tesis de la autonomía de la experimentación, que, precisamente, será el foco de nuestra atención en esta investigación.

La tesis de la autonomía de la experimentación es un supuesto central (sea éste asumido o negado) en el empirismo lógico, el historicismo, la concepción heredada, el semanticismo, y más recientemente, el nuevo experimentalismo. El modo en el que precisemos la tesis determinará en parte qué clases de respuestas podemos ofrecer a dos problemas sustantivos para la filosofía de las ciencias naturales: el problema de la carga teórica de la observación (experimental) y el problema del regreso del experimentador. En las próximas páginas explicitaremos los vínculos entre la tesis y los dos problemas que mencionamos.

La investigación que aquí ofrecemos se estructura con el propósito de satisfacer los siguientes *desiderata*:

- (i) Identificar las diferentes versiones de la tesis de la autonomía de la experimentación.
- (ii) Elucidar las versiones de la tesis con contenido filosófico.
- (iii) Determinar el alcance y los límites de dichas versiones.
- (iv) Situar la autonomía de la experimentación en el marco de un debate filosófico más amplio.

Y, para lograr estos objetivos, proponemos el siguiente recorrido:

En la primera parte de esta tesis presentamos un estado de la cuestión y formulamos un conjunto de distinciones originales que utilizaremos en capítulos posteriores. Esta

¹ Como ocurre con las obras de Allan Franklin (1986, 1989, 1999, 2001 y 2005) y Peter Galison (1987 y 1997). Constituyen una excepción tanto Giora Hon (2003) como Hans Radder (2003), quienes han intentado proponer un programa general para la filosofía de la experimentación. Comentaremos sus trabajos en el capítulo 2.

parte se articula en dos capítulos. El primer capítulo ofrece una aproximación histórica y problematizadora a los estudios sobre la experimentación en ciencias naturales. Allí se introduce la tesis de la autonomía de la experimentación y se distinguen las diferentes interpretaciones del eslogan *experiment has a life of its own*; también se explicita la relevancia de un análisis de esta tesis en relación con dos problemas: la carga teórica de la observación y el argumento del regreso del experimentador. El segundo capítulo, por su parte, proporciona un acercamiento al concepto de experimento y ofrece una tipología de los experimentos en ciencias naturales.

La segunda parte de la tesis, se ocupa del estudio de los casos que harán las veces de *base empírica* de nuestro trabajo. Hemos elegido estos experimentos como representantes paradigmáticos de una de las tipologías presentadas en el capítulo dos. Los experimentos que analizaremos son los siguientes: la medición de la velocidad de la luz mediante el método del espejo giratorio efectuada por Albert Michelson, y que se estudia en el capítulo tres; la atribución de la propiedad de refrangibilidad diferencial de los rayos que componen la luz blanca que descubriera Isaac Newton, al que dedicamos el capítulo cuatro y, finalmente, el experimento de Joseph Weber para detectar ondas de gravedad, que se analiza en el capítulo cinco.

Dedicamos la tercera parte de la tesis a la elucidación de la tesis de la autonomía de la experimentación y a su relación con el argumento del regreso del experimentador, de Harry Collins. En el capítulo sexto, señalamos la importancia de la elucidación de la tesis autonomía de la experimentación en virtud de su relevancia para dar respuesta a dos problemas: la carga teórica de la observación y el argumento del regreso del experimentador. El capítulo séptimo presentamos y analizamos el argumento del regreso del experimentador. Tras ello, caracterizamos la autonomía constitutiva de los resultados experimentales (*c-autonomía*) en el octavo capítulo de esta tesis y negamos que los resultados experimentales sean *c-autónomos*. Para mostrarlo, guiándonos por los resultados de nuestros análisis de casos de la segunda parte de la tesis, desarrollamos una semántica de los resultados experimentales en la que mostramos los diferentes grados de compromiso teórico en la producción de la evidencia empírica y extraemos consecuencias respecto de la estabilidad de la base empírica. En el mismo capítulo abordamos el problema de la producción de un resultado experimental, es decir el proceso por el cual una *marca* adquiere significado, dando como producto final un resultado experimental teóricamente interpretado.

En el capítulo noveno, nuevamente teniendo en cuenta los resultados de los estudios de casos, y algunos otros ejemplos de la experimentación en ciencias naturales, analizamos otra de las formas en las que la tesis de la autonomía de la experimentación se ha entendido en la literatura, a esta versión la denominamos *j-autonomía*, es decir, la autonomía respecto de la justificación de la evidencia empírica, y es la idea según la cual la justificación de los resultados de un experimento no requiere presuponer la verdad de la teoría de la cual la predicción del resultado se deriva. Defendemos la posibilidad de la *j-autonomía* y analizamos las distintas estrategias que permiten argumentar a favor de la corrección de un resultado experimental analizando críticamente la *epistemología del experimento* de Allan Franklin, (y a la que otros autores, como Deborah Mayo y Peter Galison, también han contribuido) y complejizándola y refinándola con la semántica de los resultados experimentales que propusiéramos en el capítulo octavo.

Culminamos esta tesis señalando la tensión que supone sostener de manera conjunta la *c-autonomía* y la *j-autonomía*, algo que es característico en muchos de los filósofos del experimento de corte analítico. Mostramos que esta conjunción nos impide ofrecer una respuesta adecuada al desafío escéptico de Harry Collins y dejamos planteadas una serie de preguntas que nos guiarán en investigaciones futuras.²

² Nota acerca de la traducción: excepto cuando es expresamente indicado, las citas son una traducción directa de la primera edición en su idioma original y la traducción es personal.

Primera Parte: estado de la cuestión y marco teórico

Capítulo I

El experimento como objeto de estudio filosófico

1.1 El surgimiento de los estudios filosóficos sobre la experimentación

Resulta llamativo, y por lo tanto, un hecho digno de explicación, que, hasta mediados de la década de 1980, no se haya considerado que la experimentación reclamase un análisis en términos filosóficos. Algo similar ocurrió con la observación científica, que no había sido estudiada en sí misma, sino, inicialmente, en relación con la tesis de la carga teórica y la posibilidad de una distinción bien motivada entre términos teóricos y observacionales. Esbozaré dos explicaciones que considero plausibles para dar cuenta de este hecho.

En primer lugar, es preciso recordar que la filosofía de la ciencia neopositivista se inscribe en el marco del giro lingüístico, contexto metametodológico bajo el cual los empiristas lógicos desarrollan sus reflexiones epistemológicas. En este ámbito, goza de pleno sentido la preeminencia del análisis del discurso científico por sobre el análisis de la práctica concreta de la ciencia en la agenda de la epistemología. Dicho en otros términos, la aplicación de lo que luego, gracias a Quine, se conocerá como *ascenso semántico* al ámbito de la filosofía de la ciencia, se corresponde con el estudio de la función y el estatus de los enunciados observacionales en detrimento del análisis de lo observado y de la observación como fenómeno epistémico (cf. Bogen, 2002, p. 131).

Por otra parte, el énfasis en el tratamiento sintáctico de las teorías científicas obedecía también a la prosecución de objetivos sociales y políticos –especialmente de los integrantes del *ala izquierda* del Círculo de Viena. Tal como afirmaron Carnap, Neurath y Hahn en el *Manifiesto del Círculo de Viena*:

La concepción científica del mundo no se caracteriza tanto por sus tesis propias, como más bien por su posición básica, los puntos de vista, la dirección de la

investigación. Como objetivo se propone la ciencia unificada. El esfuerzo es aunar y armonizar los logros de los investigadores individuales en los distintos ámbitos de la ciencia. De esa aspiración se sigue el énfasis en el trabajo colectivo; de allí también la acentuación de lo aprehensible intersubjetivamente; de allí surge la búsqueda de un sistema de fórmulas neutral, de un simbolismo liberado de la escoria de los lenguajes históricamente dados; y de allí, también, la búsqueda de un sistema total de conceptos. Se persiguen la limpieza y la claridad, rechazando las distancias oscuras y las profundidades inescrutables. En la ciencia no hay profundidades: hay superficie en todas partes. (1929, p. 112).

El ideal de un lenguaje común a todas las ciencias, que contribuyese al trabajo mancomunado de los científicos de las más diversas ramas en función del ideal ilustrado como elemento crucial para la acción social ocupó entonces un lugar privilegiado en las reflexiones del empirismo lógico, postergando, posiblemente, el interés por el análisis de la práctica científica y la producción de la evidencia empírica. A su vez, dado que fueron los objetivos trazados por esta corriente, aquellos que delinearon la agenda de la filosofía de la ciencia desde 1930 y establecieron cuáles serían los tópicos prioritarios del área, estos persistieron aun cuando, tras la muerte de Neurath, el cariz político del proyecto de la ciencia unificada había perdido impulso (cf. Zuppone, 2011). De modo que, si bien ofrecieron propuestas sustantivas respecto de cuál es por ejemplo la estructura de una teoría científica y de los rasgos de cada uno de sus constituyentes, a la vez que dieron cuenta de los procesos de contrastación de una teoría, dejaron sin plantear la pregunta –o al menos la relegaron como problema- acerca de cómo se genera la evidencia empírica que formaría parte luego del proceso de contrastación y elección de teorías.

Tras el declive del empirismo lógico, y con el auge del hipotético-deductivismo, propio de la fase clásica de la filosofía de la ciencia,³ tampoco fue habilitada la reflexión acerca de la práctica experimental. En el contexto de una filosofía de la ciencia teórico-céntrica, la experimentación, en tanto que objeto de estudio, siguió considerándose aporomática y, respecto de su valor en el ámbito de la práctica científica, se consideró que su función era la de posibilitar la elección entre teorías rivales y la contrastación de teorías (cf. Popper, 1954, § 30, p. 89). Con el historicismo, no podemos decir que la

³ Adoptamos aquí la periodización de la filosofía de la ciencia del siglo XX propuesta por Moulines (2011).

situación se revierta, cuando de procurar un análisis filosófico de la experimentación se trata; sin embargo, por la misma posición de los epistemólogos de raigambre historicista, las funciones del experimento sí son revisadas. En efecto, el historicismo reconsidera la función contrastativa de la experimentación, ya que la elección entre paradigmas en momentos de crisis no está determinada por experiencias cruciales, pero se reivindica su valor en el contexto de la ciencia normal, ya que contribuye a la articulación del paradigma⁴ y al desarrollo tecnológico (cf., por ejemplo, Kuhn, 1977).

Con lo anterior, creemos haber respondido a la pregunta respecto de por qué la producción de conocimiento experimental no se posiciona como objeto de reflexión filosófica antes de la década de 1980.⁵ Restará entonces explicar por qué luego de 1980 esta situación se revierte. Para ello, apelaremos a una analogía: así como por ejemplo, los empiristas lógicos no procuraron un tratamiento exhaustivo de la observación, ni una elucidación de este concepto y no fue hasta que el hipotético-deductivismo popperiano y el historicismo cuestionasen la posibilidad de una base empírica neutral que comenzaron a producirse estudios sistemáticos acerca de ella, podemos afirmar que algo análogo ocurrió respecto de la experimentación en las ciencias naturales. Tradicionalmente considerada como el bastión del conocimiento empírico, los filósofos sólo reconocieron la necesidad de un estudio en términos epistémicos y metodológicos de la misma como respuesta a las conclusiones relativistas a las que se arribara desde otras disciplinas. En efecto, es durante 1970 y 1980, desde las ciencias sociales (especialmente desde la antropología, la sociología y la historiografía de las ciencias naturales), que comenzó a denunciarse que la imagen heredada de la práctica experimental estaba distorsionada y que existía un fuerte componente arbitrario en la aceptación de los resultados experimentales y, en general, en la producción de conocimiento empírico. Es sólo como respuesta al constructivismo social que la filosofía contemporánea de las ciencias reconoció la necesidad de incursionar en el estudio de la práctica experimental y evaluar en qué radican sus virtudes epistémicas. Podríamos afirmar, por lo tanto, que la tesis de la carga teórica de la observación es al estudio de la observación científica lo que el argumento del regreso del experimentador (Collins, 1985) es al desarrollo de la filosofía de la experimentación.

⁴ Por articulación del paradigma me refiero a la determinación de parámetros y constantes, el establecimiento de leyes cuantitativas y a la detección de fenómenos que el paradigma vuelve esperables.

⁵ Existen, sin embargo, contribuciones aisladas como por ejemplo Leibniz (1677 y 1682), Goethe (1792), Herschel (1830), Bernard (1865), Mach (1905), Duhem (1914) y Dingler (1928). También Bunge (1967) representa una excepción entre los libros de texto escritos en el marco de la concepción clásica.

De modo más preciso, podemos atribuir el surgimiento de la filosofía de la experimentación a una reacción contra el relativismo al que pretendían conducir los resultados de los estudios sociales de las ciencias naturales. No es casual que, en buena medida, durante las primeras décadas, los *nuevos experimentalistas*, hayan dedicado sus mayores esfuerzos a responder a los argumentos de Bruno Latour y Steve Woolgar (1979), Harry Collins (1985) y Andrew Pickering (1989). Una tesis característica del constructivismo social podemos encontrarla en el siguiente pasaje de Steve Woolgar:

La conclusión más importante de nuestros ejemplos de descubrimientos es que la existencia y el carácter del objeto descubierto varían según la constitución de los diferentes entramados sociales. Y al hablar de entramado social nos referimos a las creencias, a los conocimientos, a las expectativas, al conjunto de recursos y argumentos, a los aliados y defensores; en resumen, tanto a la totalidad de la cultura local como a las identidades de los diversos participantes. Esta variabilidad socava de forma decisiva el presupuesto común de la preexistencia del objeto respecto al descubrimiento. No se trata de que el entramado social ejerza de mediador entre el objeto y el trabajo de observación realizado por los participantes. Más bien es el entramado social el que constituye al objeto (o la ausencia del mismo). (Woolgar, 1988, p. 88).

Todos los filósofos de la experimentación coinciden en rechazar la conclusión de Woolgar y en afirmar la objetividad de los resultados experimentales, aunque puedan diferir entre sí en la manera de entender cómo se alcanza dicha objetividad.

En el caso de la observación científica, como ya señalamos, se manifestó una dinámica muy semejante. El empirismo lógico no ofreció un estudio sistemático de ésta, aun cuando la observación directa fuese el criterio para trazar una distinción central en esta tradición: la distinción entre términos teóricos y términos observacionales. Por su parte, el historicismo, poniendo en jaque la viabilidad de dicha distinción a partir del concepto de *carga teórica*, propició la discusión en esta área. A la tesis de la carga teórica de toda observación, popularizada por Hanson (1958), Feyerabend (1958) y Kuhn (1970), que parecía legitimar consecuencias relativistas, le siguieron críticas ya clásicas como, por ejemplo, *Science and Subjectivity* de Scheffler (1967) y el artículo de Shimony (1977). Sólo más tardíamente, durante la década de 1980, aparecerán los

primeros trabajos que tendrán como objetivo central la elucidación del concepto de *observación científica*. Como ejemplos, recordemos el artículo de Shapere (1982) quien propone una caracterización de la observación científica en términos informacionales y el libro pionero *Representing and Intervening* de Hacking (1983). Finalmente, se publicaron los libros específicos de Brown (1987) y Kosso (1989), quienes procuran un análisis del concepto de observación en las ciencias naturales adoptando un enfoque causal-informacional que puede encontrar un precursor en la olvidada monografía de Lenzen (1938).

Ahora bien, tras esta reacción ante el relativismo y los esfuerzos por rebatir, bloquear o moderar los argumentos que blandían entusiastas los científicos sociales de las ciencias naturales, dos preguntas siguen en pie. En primer lugar, ¿qué tesis positivas proporciona la filosofía de la experimentación? ¿Cuál es su contribución sustantiva para la comprensión de la producción de conocimiento empírico? ¿Cuáles las líneas de investigación delineadas? ¿Cuáles los problemas a estudiar? Y, en segundo lugar: ¿han sido adecuadas las respuestas de los nuevos experimentalistas al desafío escéptico que supone el *argumento del regreso del experimentador* de Collins (1992)? Teniendo en cuenta lo anterior buscaremos, en este capítulo, bocetar un panorama general de las conclusiones del área y, más específicamente, reconstruir los principales temas que abordaron y las tesis más representativas de los “filósofos del experimento”. La estructuración y reconstrucción de los problemas que abordaremos es fruto de una articulación personal en la que el enfoque de los temas será predominantemente lógico y sistemático más que histórico.

A pesar de ser una subdisciplina reciente, la filosofía de la experimentación ya cuenta con un corpus de libros, compilaciones y artículos de considerable extensión; así como una diversificación en dos corrientes principales: la tradición anglosajona denominada en su momento *nuevo experimentalismo* y la tradición de corte continental, especialmente germánica.

Podríamos afirmar que la tradición anglosajona comenzó con *Representing and Intervening* de Hacking que ya mencionamos. Si bien fue concebido como un libro introductorio de filosofía de la ciencia, la segunda parte del mismo otorga a la experimentación una posición privilegiada en el marco de la epistemología. La experimentación, afirma Hacking, no sólo es un objeto de estudio filosófico en pleno

derecho, sino que comprenderla nos permitirá, a su vez, pronunciarnos respecto de problemas tradicionales como, por ejemplo, el criterio de realidad para las entidades teóricas (cf. 1983, cp. 16). Es en este libro donde Hacking propone que la experimentación tiene una vida propia, a cuyo análisis destinaremos buena parte de esta tesis. También podemos enmarcar a Allan Franklin en la corriente analítica de la filosofía de la experimentación. Como Hacking, también Franklin defenderá la autonomía de la experimentación y procurará mostrar los criterios que se utilizan para aceptar la evidencia empírica, desarrollando para esto, una epistemología de la experimentación, es decir, un conjunto de estrategias que permitirían, según el autor, argumentar a favor de la corrección de los resultados de un experimento (cf. Franklin, 1986).

La tradición continental se nuclea fundamentalmente en el Instituto Max Planck para la historia de las ciencias con sede en Berlín, especialmente en el departamento de investigación que dirige Hans Rheinberger, autor del libro *Towards an Epistemology of Epistemic Things*. Muchos de quienes se dedican a la filosofía de la experimentación en el *antiguo continente* han sido investigadores de dicho instituto; como ejemplos, podemos mencionar al israelita Giora Hon (quien actualmente es profesor de la facultad de humanidades de la Universidad de Haifa) y a Theodore Arabatzis (quien es profesor en el departamento de filosofía e historia de la ciencia en la Universidad de Atenas). También los aportes del holandés Hans Radder y de los asistentes al *Workshop* que tuvo lugar en la Vrije Universiteit Amsterdam en 2000 –y que dieron lugar a la notable compilación de Radder (2003)- no pueden dejar de señalarse. La obra más reciente de Radder (2006) sobre la observación científica se inscribe en la misma tradición, que también muestra influencias de la filosofía hermenéutica.

Asimismo es destacable el aporte de Michael Heidelberger y Friedrich Steinle, quienes editaron, en 1998 una compilación con algunos artículos muy relevantes –que abordaremos más adelante- me refiero al libro *Experimental Essays- Versuche zum Experiment*. Ambos autores representan una anomalía curiosa en el marco de la corriente germánica ya que su posición respecto a la autonomía de la experimentación los liga a una forma de neo-empirismo bastante más afín a la del *nuevo experimentalismo*.

Ambas tradiciones, como veremos a continuación, se diferencian por sus enfoques metodológicos, por los presupuestos teóricos asumidos y, consecuentemente, más por los resultados a los que arriban más que por los problemas que consideran parte de su agenda. En especial, en la corriente anglosajona, se destaca una forma de neoe empirismo que se pone de manifiesto en la insistencia con la que defienden la tesis de la *vida propia del experimento*. Los filósofos de la tradición continental, salvo las excepciones que mencionamos, son mucho más afines a una posición de corte racionalista y, por tanto, el experimento, para ellos, está fuertemente determinado por las teorías presupuestas en la interpretación de los resultados experimentales.⁶

Creo que es justo reconocer que el trabajo que señaló la agenda de la filosofía de la experimentación fue el libro de Hacking (1983), aun sin ser éste un libro dedicado exclusivamente a la experimentación. Inmediatamente después, aparecieron las obras de Robert Ackermann (1985) y Allan Franklin (1986) ahora sí, obras escritas por filósofos de la ciencia y dedicadas por completo a la reflexión acerca del conocimiento experimental; y las de Harry Collins (1985, 2004 y 2011) y Peter Galison (1987), entre las escritas por sociólogos de la ciencia. En 1988 Hacking reconocía ya la existencia de una filosofía de la experimentación que venía a llenar el vacío que la filosofía de la ciencia tradicional, principalmente orientada hacia las teorías, había dejado en el estudio de las prácticas científicas (Hacking, 1989). Al año siguiente, Ackermann publicó un breve artículo en el que acuñaba la expresión *nuevo experimentalismo* para referirse a esta tendencia o corriente de la filosofía de la ciencia (Ackermann, 1989).⁷ A partir de la década de 1990 los estudios acerca de la experimentación se multiplicaron y podemos señalar entre otros, la extensa secuencia de libros de Franklin (1990, 1999, 2002, 2004, 2005), la obra, de enfoque muy diferente, de Deborah Mayo (1996), y los libros enciclopédicos de Galison (1997) y Collins (2004), ricos en estudios detallados de casos, al igual que los de Franklin. Más abundantes son las antologías de trabajos, generalmente originales, entre las que mencionaremos las de Gooding, Pinch y Schaffer

⁶ Este es un punto que analizaré con detalle en el capítulo VIII.

⁷ Me sorprende la cantidad de corrientes que utilizan el adjetivo “nuevo” para construir su nombre sin advertir cuán rápido éste se vuelve obsoleto. Como muestra, recordemos a los historicistas en filosofía de la ciencia, que fueron llamados “los nuevos filósofos de la ciencia”. Lo mismo sucederá con los “nuevos mecanicistas” y con la “nueva teoría de la referencia” (agradezco a John Horden por recordarme este ejemplo). En el caso de los “nuevos experimentalistas” la elección del nombre es más absurdo todavía ya que no hay un precedente claro del que deban distanciarse. Si tienen en mente establecer un contraste entre la filosofía baconiana pues parece evidente que no son experimentalistas en el mismo sentido.

(1989), Koertge (1998), Heidelberger y Steinle (1998), Radder (2003), Galavotti (2003), Hon, Schickore y Steinle (2009) y González (2011).

En el marco de los resultados de la filosofía de la experimentación es posible detectar cuatro preocupaciones centrales. En primer lugar, se intenta obtener una caracterización del concepto de experimento. En segundo lugar, se intenta dar cuenta de las funciones del experimento en las ciencias naturales, con el fin de trascender la concepción hipotético-deductivista de las ciencias en las que el experimento tiene como función casi exclusiva la contrastación de teorías científicas. En tercer lugar, aunque relacionado con el segundo y retomando un aspecto central del empirismo lógico: la pregunta por la estabilidad de los datos experimentales (cf. Carrier, 1998, p. 189) que, como veremos, se relaciona con la tesis de la autonomía de la experimentación, Y, en cuarto lugar, se intenta mostrar la aceptabilidad de los resultados experimentales en virtud de criterios racionales y no meramente como producto del consenso, en clara oposición con las tesis características de los estudios etnometodológicos de la práctica científica.

1.2 Los resultados experimentales y su valor como evidencia empírica

Si la experimentación tiene como objetivo permitirnos conocer el mundo más allá de lo observable, la filosofía de la experimentación, por su parte, debería ayudarnos a comprender en qué radica la capacidad de la experimentación al momento de producir evidencia empírica. Para que la experimentación aporte evidencia sustantiva, ya sea al momento de producir nuevo conocimiento, como en el proceso de contrastación de una teoría científica, debe poder mostrarse que la actividad experimental no se encuentra en ninguno de estos dos escenarios:

- (i) el buen funcionamiento del arreglo experimental y la corrección de los resultados se determinan recíprocamente. (regreso del experimentador)
- (ii) el experimento está teóricamente cargado a favor de las teorías que permiten la interpretación de los *outputs*. (carga teórica de la experimentación)

En efecto, uno de los problemas fundamentales de los que debe ocuparse la filosofía de la experimentación consiste en indicar las razones que permitan la aceptación de los resultados experimentales. En primer lugar, mostrando que existen criterios que permiten distinguir un resultado correcto de un artefacto, así como que es posible determinar -sin incurrir en argumentos de carácter recíproco- cuál sería el resultado correcto de un experimento; en segundo lugar, mostrando que la experimentación no está teóricamente cargada en un sentido que invalide sus resultados en sus funciones exploratoria y contrastativa. Como veremos en los próximos capítulos, estos dos imperativos de la práctica experimental, cuando no son debidamente precisados, entran en tensión. Por una parte, la pretensión absoluta de autonomía del experimento respecto de la teoría nos conduce a una forma de regreso en el que la determinación del buen funcionamiento del arreglo experimental y del resultado correcto se deben establecer recíprocamente; por otra parte, cierta forma de carga teórica puede ser un impedimento al momento de la producción de conocimiento empírico, en un sentido análogo a lo que sucede en el caso de la observación. Tras haber analizado un conjunto de casos de experimentos en la historia de la física y evaluado de qué modo impacta la teoría en la constitución y la justificación de la evidencia empírica, nos ocuparemos de ambos problemas en la tercera parte de este trabajo. La forma en la que lo haremos dependerá de un análisis previo de las relaciones entre teorías y experimentos, que introduciremos en la próxima sección.

1.3 Las relaciones entre teorías y experimentos

Entre los diferentes núcleos de debate en el marco de la filosofía de la experimentación, uno de los temas centrales a elucidar es la relación entre teorías y experimentos y, en especial, la tesis de la *autonomía de la experimentación* (en adelante *TAE*), que frecuentemente se expresa con el eslogan que popularizó Hacking “la experimentación posee una *vida propia*” (1983, p. 150).

Si bien Hacking no proporciona ninguna referencia para el eslogan, Ernst Nagel en su clásico trabajo *The Structure of Science*, había utilizado la misma expresión, pero para referirse a la independencia de las leyes experimentales respecto de las teorías en

las que las primeras son subsumidas. Según Nagel, las leyes experimentales poseen una cierta autonomía respecto de las teorías científicas, y entiende por *la vida propia de las leyes experimentales* que:

Aunque una ley experimental sea explicada por una teoría dada y quede incorporada, de este modo, al armazón de ideas de esta última, la ley continúa teniendo dos características. Conserva un significado que puede ser formulado independientemente de la teoría; y se basa en elementos de juicio observacionales que, eventualmente, permitirán a la ley sobrevivir al abandono de la teoría. (...). Estos hechos indican que *una ley experimental tiene una vida propia*, por decir así, que no depende de la vida de ninguna teoría particular que pueda explicarla. (Nagel, 1961, pp. 90-91; cursivas nuestras).

Nagel señala que las generalizaciones empíricas de bajo nivel, por ejemplo, las leyes de reflexión o refracción de la luz, la tercera ley de Kepler, por mencionar sólo algunas, pueden formularse y aplicarse con independencia de las teorías científicas. Ahora bien, mientras que la formulación de una generalización empírica es posible sin mediación teórica, la explicación de dichas leyes, y la comprensión respecto de en virtud de qué mecanismos y procesos los sistemas físicos obedecen dichas leyes o manifiestan cierto comportamiento, requiere necesariamente la incorporación de las mismas en una teoría. Por ejemplo, tanto la teoría corpuscular de la luz propuesta por Newton como la teoría ondulatoria desarrollada por Huygens, permitían derivar las dos primeras leyes que mencionamos de sus respectivas teorías explicándolas, sin embargo, a partir del comportamiento de la luz propuesto por cada teoría.

Sin embargo, cuando veintidós años más tarde Hacking impuso el eslogan, la filosofía de la ciencia había cambiado. Los epistemólogos de raigambre historicista como Hanson, Feyerabend y Kuhn habían puesto en cuestión la neutralidad de la observación. ¿Cómo afirmar entonces que el experimento es autónomo si toda observación y, por consiguiente, todo experimento está cargado de teoría? ¿Cómo afirmar la estabilidad de la base empírica en los cambios paradigmáticos? Sostener *TAE* requirió pues, una elaboración que limitara el alcance de la tesis de la carga teórica. Asimismo, como hemos visto, los defensores de la llamada concepción estándar de las

teorías, habían confinado el experimento a la contrastación de las teorías científicas (cf. Popper, 1959, § 30, p. 89), mientras que los historicistas habían problematizado dicha función, reivindicando muchas otras (cf. Kuhn, 1977, cp. 8). La filosofía de la experimentación asumió entonces, como parte de su agenda, el desafío de dar plausibilidad tanto a la neutralidad de la base empírica como a la incidencia de la dimensión teórica en los experimentos. Ahora bien, *la vida propia del experimento* es una expresión multívoca, por lo que nos dedicaremos a continuación a distinguir los sentidos que esta tesis adopta en los diferentes autores que la han aceptado.

Es principalmente en el noveno capítulo de su libro, donde Hacking (1983) busca recuperar las diversas funciones que desempeñó el experimento en la historia de la ciencia, y con ello, intenta trascender las limitaciones que tanto el empirismo lógico, especialmente con Carnap y Hempel, como el hipotético-deductivismo, con Popper, como los epistemólogos historicistas -entre los que destacaremos especialmente a Hanson y Kuhn- habían impuesto al experimento. Si la experimentación posee funciones que no se reducen a la puesta a prueba de las teorías científicas, sugiere Hacking, ésta es susceptible de recibir un tratamiento filosófico independiente de su función en la puesta a prueba de las teorías.⁸ Afirma Hacking:

Hay una versión fuerte de las afirmaciones de Leibig, según la cual un experimento es relevante sólo si se pone a prueba una teoría acerca del objeto que se investiga. (1983, p. 154).

Tras esta afirmación, Hacking insistirá en las múltiples funciones que posee el experimento en la práctica científica, entre ellas:

- 1- La contrastación de teorías.
- 2- La determinación del valor de parámetros y constantes.
- 3- El establecimiento de generalizaciones empíricas de bajo nivel, denominadas también hipótesis tópicas.
- 4- La exploración de nuevos dominios y fenómenos.

⁸ De todos modos, entiendo que, aun si la única función del experimento fuese la contrastación, eso no inhabilitaría la pertinencia del tratamiento filosófico del experimento por sí mismo.

- 5- La creación de nuevos fenómenos.
- 6- El perfeccionamiento de tecnologías vigentes.

Ese es, entonces, el primer sentido que adopta *TAE* y que formularemos así:

- (1) El experimento posee una vida propia ya que no tiene como única función la contrastación de teorías científicas.

Hasta aquí, *TAE* no es objeto de mayores controversias –al menos no en la filosofía de la ciencia contemporánea- pero tampoco es una afirmación filosóficamente interesante. Esta versión tiene un componente básicamente descriptivo –en la medida en que afirma cuáles son de hecho las funciones de la experimentación en la historia de las ciencias- y nos conduce a asumirla como la expresión de un hecho empírico. En efecto, es en virtud de examinar la historia de la ciencia que ésta nos muestra que muchos experimentos realizados no tenían como finalidad la contrastación de teorías sino la exploración de nuevos fenómenos, etc. Desde luego, para la filosofía de la ciencia clásica es una tesis sustantiva y, también lo es en el contexto de la filosofía de la ciencia historicista. Dado que para el empirismo lógico, el experimento es fundamental al momento de proporcionar evidencia empírica y confirmar o disconfirmar teorías; y que para el historicismo -especialmente para Kuhn- la experimentación es central en la medida en que contribuye a la articulación del paradigma vigente, a la resolución de *puzzles* y a la detección de anomalías; pero que ninguna de las funciones que estas corrientes reconocen al experimento agota lo que esta vía de conocimiento ofrece a las ciencias naturales, la tesis de la autonomía funcional del experimento mostraría que ambas tradiciones han concebido la función del experimento de un modo parcial que requiere una revisión a la luz de la evidencia empírica.

Existen, sin embargo, cuatro interpretaciones más de *la vida propia del experimento*, y la adhesión conjunta a dos de ellas implica consecuencias epistemológicas relevantes, reclamando, entonces, una mayor precisión conceptual.

Una segunda formulación de *TAE* afirma lo siguiente:

- (2) El conocimiento experimental persiste frente al cambio teórico. (Cf. Mayo, 1996, p. 62).

Uno de los aspectos que suelen señalar los filósofos del experimento es la persistencia de los datos y los logros de la labor experimental en el contexto del cambio teórico. Las leyes experimentales se conservan, y de hecho se espera que las nuevas teorías aceptadas puedan dar cuenta de las mismas. Pero no sólo las generalizaciones empíricas son estables en el contexto del cambio interteórico, sino también las constantes, los parámetros y los resultados de las mediciones y determinaciones obtenidas en la práctica experimental. Para un realista de entidades como Hacking, también persiste el significado de los conceptos que refieren a las entidades tradicionalmente denominadas *teóricas* cuando éstas satisfacen los criterios de intervención (cf. 1983, p. 218 y ss.) y de manipulación (cf. 1983, p. 291 y ss.). La estabilidad de los datos experimentales implica, a su vez, una forma de neutralidad teórica que denominaremos *c-autonomía* y será examinada en el capítulo ocho.

La tercera versión de la tesis que podemos distinguir es la siguiente:

- (3) Los experimentos poseen una vida propia ya que la corrección de sus resultados posee una justificación teórico-independiente (cf. Mayo, 1996, p. 62).

Esta versión de la tesis, tiene como objetivo alejarse de las conclusiones del constructivismo social. La idea que subyace a la autonomía respecto de la justificación (en adelante: *j-autonomía*) es que es posible determinar la corrección de los resultados experimentales a partir de criterios que son internos a la práctica científica y que, en su mayor parte, no presuponen la verdad de la teoría que explica los resultados obtenidos.

El cuarto sentido en el que se ha defendido la autonomía de la experimentación se relaciona con la idea de intervención enfatizada por Hacking como criterio de realidad: la versión pragmática de la vida propia del experimento.

- (4) Las habilidades prácticas, en especial la manipulación –y no la teoría- son determinantes en la distinción entre entidades y artefactos en la práctica experimental (cf. Hacking, 1983, p. 191).

Por último, señalaré una desambiguación más de la tesis, esta vez atribuida a Galison, y de cariz fuertemente sociológico. En su libro *Image and Logic* (Galison, 1997), el autor documenta la división del trabajo científico y recorta tres sub-culturas con roles específicos: los teóricos, los experimentalistas y los ingenieros. Dado que el cruce entre los integrantes de dichas subculturas es esporádico y que se potencia especialmente en momentos de crisis de los fundamentos, durante la ciencia normal, recuperando la expresión kuhniana, la labor de cada uno de estos grupos es autónoma.

(5) Los compromisos epistémicos de experimentalistas y de teóricos difieren (cf. Galison, 1997, p. 248).

Galison diferencia, como hemos indicado, tres sub-culturas que forman parte de la comunidad científica, ilustrando su propuesta con una notable labor historiográfica y sociológica que nos introduce en el mundo de la experimentación en microfísica. Estas subculturas, especialmente la teórica y la experimental, difieren respecto de sus formas de argumentar, respecto de sus prácticas y respecto de los distintos tipos de compromisos epistémicos que asumen. Respecto de este último punto, Galison distingue tres grados de límites o condiciones bajo las cuales las diversas subculturas operan: condiciones o restricciones a largo plazo (*long-term constraints*), a mediano plazo (*middle-term constraints*) y a corto plazo (*short-term constraints*). En el caso de las primeras, y en el mundo de los teóricos, encontramos especialmente compromisos de carácter metafísico, es decir, aquellos presupuestos ontológicos que modelan la conceptualización del mundo físico, por ejemplo, la preferencia por los corpúsculos o las ondas, por una ontología de campos o de fuerzas a distancia, etc. Por su parte, en el ámbito experimental, afirma Galison, la restricción fundamental es la experticia, que está fuertemente ligada al desarrollo del instrumental con el que los miembros de esta subcultura operan y que da forma, inclusive, a modos de argumentación característicos. Estas preferencias argumentativas dividen a los experimentalistas en dos tradiciones: la *estadística* y la *visual*, es decir aquellos que consideran que la repetición es la vía privilegiada para establecer la evidencia empírica como tal y aquellos que se apoyan en el *evento dorado* para la confirmación. Estos diferentes tipos de compromisos y de prácticas configuran otro modo en el que los experimentos pueden considerarse como autónomos respecto de las teorías.

En el resto de este trabajo nos ocuparemos sólo de dos de las formas de autonomía que presentamos en este apartado. En el capítulo octavo nos centraremos en la segunda de las elucidaciones de la tesis de la autonomía de la experimentación, la *c-autonomía* y defenderemos la necesidad de un estudio del contenido proposicional de los resultados experimentales para tomar posición respecto de si acaso esta forma de autonomía se satisface en la práctica experimental. En el capítulo noveno, nos ocuparemos de analizar en extenso la tercera forma de autonomía presentada, es decir, la *j-autonomía*.

Capítulo II

Los experimentos en las ciencias naturales

2.1 ¿Qué es un experimento?

En su obra *A Preliminary Discourse for the Study of Natural Philosophy*, John Herschel, a quien se atribuye el descubrimiento de Urano, se preguntaba por la diferencia entre una observación y un experimento y trazaba una primera distinción que resulta especialmente relevante para nuestros propósitos. Su respuesta era la siguiente:

La experiencia puede obtenerse de dos modos: ya sea, en primer lugar, reconociendo hechos en la medida en que estos ocurren, sin intención alguna de influir en la frecuencia de dicha ocurrencia, o de variar las circunstancias en las que estos hechos ocurren; a esto denominamos *observación*. O, en segundo lugar, poniendo en acción causas y agentes sobre los cuales poseemos control y, deliberadamente, variando las combinaciones entre estos y reconociendo qué efectos acontecen; a esto denominamos *experimento*. [...]. No pretendemos, sin embargo, cuando distinguimos las observaciones de los experimentos, establecer entre ellos un contraste. Esencialmente son semejantes, y difieren más en grado que en clase; de modo que, quizás, los términos *observación pasiva* y *activa* expresarían mejor la distinción existente. (Herschel, [1830], (2009), p. 76-77).

En efecto, la idea según la cual observación y experimento presentan diferencias de grado que dependen de la manipulación del objeto de estudio es aceptada ampliamente. El mismo criterio aparece, más tardíamente, en *Introduction a l'étude de la médecine expérimentale*, de Claude Bernard:

¿Dónde reside, pues, se preguntará, la distinción entre el observador y el experimentador? He aquí: se da el nombre de observador a quien aplica los procedimientos de investigación simple o compleja al estudio de los fenómenos que él no modifica, los que recoge, en consecuencia, tal como la naturaleza se los ofrece. Se da el nombre de experimentador a quien emplea los procedimientos de investigación simple o compleja para hacer variar o modificar, con un objetivo cualquiera, los fenómenos naturales y hacerlos aparecer en circunstancias o en condiciones en las que la naturaleza no se los presentaba. (Bernard, 1865, p. 26).

También las ideas expresadas por Bernard señalan una diferenciación entre experimentos y observaciones según las condiciones en las que la investigación se realiza. Mientras que la observación no supone ningún tipo de intervención sobre el objeto de estudio, la experimentación supone una acción dirigida y representaría el intento por *despertar a la naturaleza* al que Bacon se refería en su *Novum Organon*.

La distinción basada en la manipulación del objeto de estudio y en la intervención del investigador para la producción de un evento no espontáneo se extendió al pensamiento contemporáneo. En efecto, también Carnap acepta que la diferencia entre realizar una observación y conducir un experimento es de grado y que depende del papel activo o pasivo que desempeñe el investigador. En sus palabras:

Como hemos visto, todo conocimiento empírico se basa en observaciones, pero estas observaciones pueden realizarse de dos maneras esencialmente diferentes. En la manera no experimental, desempeñamos un papel pasivo. Simplemente miramos las estrellas o algunas flores, notamos semejanzas y diferencias, y tratamos de descubrir regularidades que puedan expresarse como leyes. En la manera experimental, asumimos un papel activo. En vez de ser espectadores, *hacemos* algo que producirá mejores resultados observacionales que los que obtenemos simplemente mirando la naturaleza. En vez de esperar hasta que la naturaleza nos ofrezca situaciones para observar, tratamos de crear tales situaciones. En resumen, *hacemos experimentos*. (Carnap, 1966, p. 40, cursivas en el original).

Dada la aceptación de una continuidad entre observaciones más o menos manipulativas y experimentos, no debe resultar sorprendente que ciertas elucidaciones del concepto de observación sean útiles al momento de pensar la experimentación. Consideremos a continuación el enfoque causal de la observación que, si bien es desarrollado *in extenso* en los libros de Brown (1987) y Kosso (1989), tiene como precursor a Victor Lenzen, quien en el capítulo II de su monografía *Procedures of Empirical Science* considera a la observación como el resultado de inferencias de causas hipotéticas a partir de fenómenos perceptibles. Allí afirma Lenzen:

Se infiere también que existen entes no-perceptibles como las causas hipotéticas de los fenómenos perceptibles. Tal inferencia por causalidad se convierte finalmente en observación. (1938, p. 15).

El autor considera que toda observación involucra una serie de hipótesis y además considera legítima la aplicación del concepto en diferentes situaciones científicas que involucran diferentes instrumentos y que suponen interpretaciones a partir de teorías bien confirmadas y aceptadas por la comunidad científica en un momento determinado.

Veamos ahora cuál es el criterio de observabilidad propuesto por Harold Brown en *Observation and Objectivity*. El autor afirma que una entidad o suceso resulta observable en el caso en que podamos establecer una cadena causal lineal entre una cierta entidad no accesible a los sentidos desnudos, y un efecto que sí es perceptible por nuestros sentidos (sea el contenido de la percepción una imagen o el sonido emitido por un contador Geiger al detectar una partícula). Dicho en sus términos:

Uno observa un *ítem* que no es asequible a la examinación directa, examinando otro *ítem* que sí es asequible a nuestros sentidos, y que es el resultado de una cadena causal que involucra al *ítem* sometido a la observación. (Brown, 1987, p. 51).

La condición de la linealidad de la cadena causal a la que antes nos referimos resulta fundamental, ya que de existir distintas causas posibles para la producción de un fenómeno, no sería determinable cuál es concretamente el origen de la aparición del fenómeno en estudio. Esta condición se satisface apelando al conocimiento más confiable del que el científico dispone, desechando entonces otras causas posibles del mismo fenómeno. De no ser esta condición satisfecha persistirá la indeterminación de lo observado. Esto es, dado un fenómeno con dos o más causas probables, no podrá decidirse cuál es la causa del fenómeno y por lo tanto, no se podrá afirmar qué evento se ha observado. Para dar un ejemplo sencillo, supongamos que queremos determinar el PH de una solución de permanganato de potasio, cuyo color vira al pasar de un PH neutro (7.0) a un PH ácido (< 7.0). Si la única causa del viraje al rosado de la solución es la variación del PH, entonces puede afirmarse que se ha observado el cambio de PH de la solución y, dependiendo del tono, podrá inclusive afirmarse el grado de acidez de la solución. Ahora bien, si otro de los factores que incide en el cambio de color de la sustancia en estudio es el contacto con el oxígeno (y esto no produce una variación concomitante del PH) y si el sistema en estudio no ha sido aislado, entonces, no es posible afirmar que se ha observado un cambio en la acidez de la solución. En esa situación o bien la solución modificó su acidez, o bien hubo contacto con oxígeno, o ambas cosas. (Este es un problema fácil de resolver, desde luego, aislando el sistema, pero muestra que es necesario eliminar otras causas que puedan producir el mismo efecto directamente perceptible).

Como se habrá notado, la concepción causal de la observación que propone Brown, hace recaer sobre la observación una serie de hipótesis teóricas que irán desde las presupuestas en la construcción de los aparatos hasta teorías que permitirán la interpretación de los datos obtenidos. Esto implica, desde luego, la falibilidad y revisabilidad de las interpretaciones de lo observado.

En suma, podemos pensar a la experimentación como una práctica intervencionista, en la que el fenómeno a estudiar es adecuadamente aislado con el fin de garantizar la linealidad de la cadena causal entre *input* y *output*, en la que este último será un evento directamente perceptible a los sentidos desnudos. El análisis de la cadena causal implicada al momento de obtener un resultado experimental será clave en el momento de la interpretación de lo observado, es decir, en el proceso de constitución de un resultado experimental y, al mismo tiempo, la investigación de la linealidad de la

cadena causal establecida será en extremo relevante en el aspecto metodológico de la experimentación, es decir, en el momento de determinar la corrección de lo medido y de minimizar las causas de error.⁹

Actualmente, y, en línea con lo que sostuvo Herschel, tiende a aceptarse que la distinción entre observaciones y experimentos es sólo una distinción de grado, ya que por lo general las observaciones en muchas disciplinas científicas también involucran alguna forma de control, manipulación y modificación del objeto en estudio. Si afirmamos que *observamos* –de acuerdo con las concepciones de observación científica que presentamos antes- una partícula subatómica, resulta claro que admitimos que la observación no es la recepción pasiva de contenidos perceptuales, sino un largo proceso de intervención en el que la percepción es el último momento. Incluso en técnicas relativamente simples empleadas para la observación, por ejemplo, de componentes celulares o de tejidos, se requieren tratamientos específicos, que involucran claramente la “actividad intencional” (Bernard, 1865, p. 19) del observador y una serie de perturbaciones (tratamientos histológicos, procesamiento mecánico de muestras, separación de compuestos) que no permiten entender la observación sólo como una actividad pasiva.

Si bien señalamos esta continuidad, es preciso también tener en cuenta que el mismo desarrollo de las ciencias naturales ha contribuido a que el concepto de experimento posea una extensión más amplia que la que originalmente le atribuíamos. Por ejemplo, Galison, en *Image and Logic*, relata cómo, a partir de los desarrollos tecnológicos vigentes y la posibilidad del almacenamiento informatizado de datos, la función del experimentador puede reducirse a la interpretación de datos en cuya obtención no ha intervenido.

Existe un camino extenso, irregular y repleto de rupturas entre la época en la que era impensable que un físico pudiera ser alguien más que quien construye equipos, diseña procedimientos, manipula experimentos, consigna resultados y los analiza, a una época en la que es universalmente aceptado contar como un experimentador a alguien que permanece frente a una computadora separado por miles de millas del instrumento. (...). Estas modificaciones en la práctica contradicen la idea de que

⁹ Sobre este punto se vuelve en los capítulos VIII y IX, respectivamente.

existe un único y unitario concepto de experimento. Experimento y experimentador están ligados, sus significados cambian conjuntamente. (Galison, 1997, p. 5).

El rol del experimentador se ha modificado históricamente en virtud de los avances teóricos y tecnológicos. La experimentación, en el devenir histórico, se ha convertido en una práctica social y de gran complejidad, en la que, según señala Galison, sería posible reconocer una dinámica que involucra al menos tres sub-culturas: los teóricos, los experimentadores en sentido estricto, y los ingenieros: quienes diseñan y construyen los instrumentos (cf. Galison, 1997, p.8).

En las discusiones contemporáneas se han realizado diversos esfuerzos por precisar el concepto de experimento. En efecto, responder qué es un experimento parece ser la pregunta fundamental y el punto de partida obligado en una reflexión filosófica sobre la experimentación. Según Wenceslao González, por ejemplo, la caracterización del concepto de experimento debe articularse en torno a diferentes ejes. En sus palabras:

1) En sentido semántico, el experimento posee un sentido y una referencia diferentes del concepto de “observación”. 2) En sentido lógico, el experimento es un componente estructural de la ciencia diferente a las teorías y en principio, también distinto de los modelos. 3) En un sentido epistemológico, el experimento se encuentra ligado a la producción de conocimiento confiable que se adquiere por medio de un proceso mediato. 4) En un sentido metodológico, el experimento se relaciona con un proceso que debe ser repetible y, por lo tanto, está usualmente asociado con la reproducibilidad y la repetibilidad. 5) En un sentido ontológico, el experimento se vincula con la idea de *otredad* (es decir, con algo que -siendo real o no- es utilizado para la puesta a prueba). 6) En un sentido axiológico, los experimentos pueden orientarse según diversos valores teniendo en cuenta los distintos objetivos perseguidos. (González, 2011, p. 26-27).

Por su parte Giora Hon, en la conocida compilación de Heildelberger y Steinle (1998), se preguntaba:

¿Cómo desentrañaremos en sentido filosófico la actividad en un laboratorio? No resulta de suyo evidente que la experimentación, en tanto que actividad, tenga una estructura formal. Asumiendo de todos modos que posee una estructura, tampoco resulta evidente que la misma posea un conjunto de elementos constitutivos que puedan ser analizados separadamente y, posteriormente, reconstruidos. (Hon, 1998, p. 228).

Y, como un intento de respuesta, comenzaba por discutir una sugerencia de Bohr:

De acuerdo con Bohr, “con el término *experimento* sólo podemos significar un procedimiento a partir del cual somos capaces de comunicar a otros qué hemos hecho y qué hemos aprendido” [...]. Sin embargo, un experimento no es simplemente un procedimiento por el cual uno es capaz de comunicar a otros lo que ha hecho y lo que ha aprendido a partir de los resultados. (Hon, 1998, p. 232).

En primer lugar nos podemos preguntar si la referencia a Bohr es pertinente cuando intentamos ofrecer una caracterización de los experimentos en ciencias naturales. En segundo lugar nos podemos preguntar si la lectura que nos ofrece Hon es una lectura justa de Bohr. ¿Estaba Bohr ofreciendo una definición del concepto de experimento? Por mi parte me atrevería a decir que es en virtud de los problemas que supone la interpretación de los experimentos en mecánica cuántica más sus compromisos filosóficos, que el filósofo danés sugiere que el experimento es un modo de comunicación y transmisión de ciertos fenómenos reproducibles. La influencia que la filosofía kantiana ejerció en su propio desarrollo intelectual, su compromiso con el giro lingüístico, su renuncia a una interpretación en términos metafísicos de la mecánica cuántica, son algunas de las razones que le conducen a realizar la afirmación que cita Hon y que culmina con la exhortación de la conservación del lenguaje clásico y con la postulación del principio de complementariedad (cf. de Ronde, 2011). Más que una definición de experimento, Bohr está insinuando qué *no* debemos pretender de un experimento *en mecánica cuántica*, qué *no* debemos buscar en el desconcertante experimento de la doble rendija. No busquemos en éste, nos dice, las causas

subyacentes de lo observado; no busquemos en éste más que una vía de comunicación en la que se preserve el uso de los conceptos clásicos.

¿Qué es entonces un experimento? Hon prosigue con estas palabras:

Un experimento –y esto es central en la tesis que estoy defendiendo- es un procedimiento, un proceso físico que puede ser capturado (*cast*) en un argumento de naturaleza formal. Una característica crucial de un experimento es que su resultado pretende instituirse en conocimiento físico y este rasgo lo diferencia de un mero procedimiento. La conclusión de un experimento, por tanto, puede pensarse como el resultado de una cadena de razonamientos sobre el comportamiento de un sistema material. La conclusión se conecta entonces con un cierto modo de razonamiento. Un experimento puede presentarse de modo tal que exhiba una inferencia desde ciertas premisas hacia una conclusión –el argumento del experimento. (Hon, 1998, p. 233).

En la medida en que un experimento no es simplemente un proceso físico, sino que es un proceso deliberadamente conducido con propósitos epistémicos, debe poder extraerse la información generada en el desarrollo del experimento. Este proceso físico, sugiere Hon, es expresable en términos proposicionales¹⁰ y resulta posible establecer una relación inferencial entre las proposiciones que guarde relación con el proceso que está teniendo lugar en el arreglo experimental. Según Hon, el experimento puede ser representado por un argumento cuyas premisas son los estados iniciales del sistema que se examina. La conclusión del argumento experimental es el resultado teórico al que se arriba y, finalmente, la relación de inferencia entre premisas y conclusión varía dependiendo del experimento considerado. En algunos casos la inferencia será deductiva; en otros, inductiva y en otros, abductiva, etc. dependiendo del experimento considerado.

La regla de inferencia que relaciona las premisas con las conclusiones no puede fijarse de manera general, esto es, si afirmamos que es, por ejemplo, inductiva,

¹⁰ Desde luego, dependiendo de cuál sea nuestra posición respecto de la incidencia del conocimiento tácito en la experimentación, habrá que moderar esta afirmación.

perderemos aquellos casos en los que la regla es de hecho deductiva, o abductiva. Todo depende del experimento y, en particular, cuál es la naturaleza de las condiciones iniciales y cómo se vinculan con el/los resultado/s experimental/es. Esta es la razón por la que me expreso en términos generales. (Hon, 2013, comunicación personal).

La conclusión del argumento experimental es un resultado experimental teóricamente interpretado. Si bien Hon no lo afirma explícitamente, se sigue de los ejemplos que ofrece, como en este caso:

¿Cómo es que el proceso físico que llamamos experimento culmina en una afirmación con pretensión cognitiva que puede afectar [el destino de] una teoría? Tomemos por ejemplo la siguiente conclusión experimental “las propiedades electrostáticas y electromagnéticas de los rayos catódicos son, o bien nulas, o bien sumamente débiles” El hecho de que esta afirmación con pretensión cognitiva, resultado de un set de experimentos llevados a cabo por un experimentador talentoso, sea considerada todavía hoy falsa [...] nos muestra que hay un elemento adicional en el experimento. El error que encontramos en el experimento de Hertz no puede asociarse con el proceso físico en sí mismo, por el contrario, los errores nos muestran afirmaciones con pretensión de conocimiento. Un error refleja la existencia de un argumento en el cual podemos acomodar el proceso experimental. Es este argumento oculto aquel en el que se basa la afirmación que pretende instituirse como conocimiento. (Hon, 1998, pp. 232-233).

En este caso, el autor indica que la conclusión experimental es la afirmación según la cual “las propiedades electrostáticas y electromagnéticas de los rayos catódicos son, o bien nulas, o bien sumamente débiles”. Esto es lo que se infiere, según Hon, de los estados iniciales del sistema y de, posiblemente, alguna ley que esté presupuesta en el arreglo experimental (comunicación personal). Creo que esto es errado. En principio, con las premisas que Hon está dispuesto a reconocer, no habría –o al menos no encuentro- forma de inferir (por regla de inferencia alguna) la conclusión experimental

que pretende. En todo caso, debería proporcionar una reconstrucción de un experimento y mostrar cómo éste ejemplifica su propuesta. Esto, sin embargo, no invalida la posibilidad de que, en efecto, un experimento sea un procedimiento físico al que se asocie un argumento. Aunque para defender esta idea, sería preciso formular más apropiadamente en qué consiste dicho argumento.

En un trabajo posterior, Hon modifica la estrategia para comprender cuál es la estructura de los experimentos. En este caso acude a la detección de distintas formas en las que el error se presenta en la práctica experimental. Buscando una analogía con los ídolos del conocimiento que propusiera Francis Bacon en el *Novum Organon*, y, en especial, enfocándose en los *ídolos del teatro*, Hon propone cuatro formas de error que inciden en la experimentación, y con ello, cuatro ámbitos diferenciables en un experimento: el guión, el escenario, el espectador y las moralejas. En sus palabras:

Haciendo uso del lenguaje metafórico de Bacon y guiándome por los ídolos del teatro, sugiero diferenciar cuatro clases de ídolos que asedian al experimento: los ídolos del guión, del escenario, del espectador y de la moraleja. La imagen de una obra teatral constituye una metáfora fructífera y conveniente, ya que un experimento, -al igual que una obra teatral- es el resultado de una actividad que verdaderamente contiene un espectáculo en su seno. [...]. En un experimento, la naturaleza es forzada, si se quiere, a representar un *show* en un escenario concebido y diseñado según un guión. El *show* se observa y registra por un espectador, sea este humano o no y, finalmente, se propone una interpretación que permite obtener una *moraleja*, es decir, el *outcome* del experimento en tanto que conocimiento sobre el mundo físico. Estos cuatro ídolos del experimento reflejan los elementos de un proceso experimental: las teorías presupuestas en el experimento -el guión; los presupuestos relativos al instrumental y a su funcionamiento- el escenario; la toma de datos y de mediciones- el espectador; y, finalmente, las conclusiones teóricas- la moraleja. (Hon, 2003, p. 190).

El uso de los ídolos del teatro baconianos parece ser un recurso meramente retórico. Hon toma la teoría de los *ídola* metafóricamente y la analogía entre experimento y espectáculo, literalmente. Con ello, el recurso a Bacon no parece legítimo ni tampoco parece contribuir a la discusión. Y es que en la *nueva filosofía* de Bacon, la doctrina de

los *ídola* se relaciona con aquellas nociones falsas que se nos presentan, por diversas razones, como verdaderas y que, de no mediar una excesiva vigilancia, nos impiden el acceso al conocimiento. Al respecto, afirma Bacon:

Los ídolos y nociones falsas que están ahora en posesión del entendimiento humano y hondamente afirmados en él, no solamente lo llenan de tal modo que es difícil abrir el paso a la verdad, sino que después de haber cedido el paso hacia ella, se pondrán delante otra vez y le servirán de estorbo en la renovación misma de las ciencias a menos que el hombre, advertido contra ellos, se haga tan fuerte como sea posible. (*Novum Organon*, L I, XXXVIII).

Entre las clases de ídolos, o de prejuicios que nos mueven al error, Bacon pone énfasis en los ídolos del teatro, es decir, en aquellos prejuicios que son el resultado de la aceptación de falsos dogmas filosóficos o del uso de principios de demostración inadecuados. Cuando se la toma seriamente, la analogía que Hon propone resulta, cuanto menos, forzada.

Otra pregunta que surge tras considerar las de estas dos propuestas de Hon para dar con la estructura de un experimento tiene que ver con lo siguiente: ¿son compatibles? Notemos que con la primera caracterización se piensa a un experimento como un proceso físico que puede ser reconstruido en términos de un argumento. Bajo esta propuesta, indica Hon, el experimentador debe dar con las premisas a partir de las cuales se deriva el resultado del experimento. En su segunda propuesta, el experimento se concibe como una representación de un suceso físico, análoga a una representación teatral. En este caso, el experimentador, siguiendo con la analogía, es el director de la obra. Pero si esto es así, el experimentador es el responsable de poner en escena un guión determinado, y por lo tanto, debería conocer de antemano las premisas de aquellas leyes y condiciones iniciales que estarán operando en el sistema experimental.

Tampoco resulta provechoso el contrapunto entre elementos en una puesta en escena teatral con los elementos presentes en un experimento. En primer lugar, porque en un experimento se intenta descubrir y/o comprender algún aspecto del mundo físico. Con ello, el experimentador, al final del proceso, se encontrará en una situación cognitiva

diferente, algo que no sucederá, al menos no por las mismas razones, con el director de una obra, quien claramente cuenta con una ventaja epistémica respecto del desarrollo de la obra que no posee el experimentador respecto de su investigación. Finalmente, tampoco el último de los elementos que Hon distingue- la *moraleja*- parece constitutivo de una representación teatral. No todo guión se resuelve con una enseñanza, es decir, no toda puesta teatral persigue un objetivo epistémico, mientras que lo central a la experimentación exploratoria es, precisamente, su función cognitiva. Inclusive, mientras que en el caso de una representación teatral es el espectador el receptor del contenido edificante, si lo hubiese; en el caso del experimento, es el mismo investigador quien debe extraerlo.

Otro de los filósofos que ha realizado aportes en lo que concierne a la caracterización de los experimentos es Ian Hacking. El epistemólogo enumera, en su artículo de 1992, los elementos que conforman un experimento. En ese trabajo afirma:

Admitiendo, como lo hago, que existen entre los experimentos menos rasgos en común que aquellos que podemos imaginar, de todos modos listaré algunos elementos que pueden encontrarse. Su relevancia y, de hecho, su presencia, varía de caso en caso y de ciencia en ciencia. (Hacking, 1992, p. 43).

Los elementos que Hacking distingue son los siguientes:

Ideas: en esta categoría se incluyen todos los componentes intelectuales del experimento. Involucra el bagaje teórico del que dispone el experimentador al momento de proyectar su investigación, los objetivos del experimento y las hipótesis que serán contrastadas (en caso de que las haya), así como los modelos de diseño experimental, del funcionamiento de los instrumentos utilizados y de los materiales que habrán de emplearse.

Materiales: esta categoría está conformada por el conjunto de objetos implicados en el experimento. Se refiere tanto al objeto investigado como a los elementos que se utilizan para su estudio.

Marcas: esta categoría incluye todo tipo de datos y las manipulaciones estadísticas de los mismos, incorporando entonces, tanto los datos obtenidos como su procesamiento matemático y la selección de aquellos que habrán de ser aceptados para su tratamiento estadístico.

Es sin embargo Hans Radder, uno de los principales exponentes de la vertiente continental de los estudios sobre la práctica experimental, quien proporciona –al menos a mi juicio- una caracterización más precisa del concepto que estamos estudiando. En su artículo *Experimenting in the Natural Sciences*, de 1995, afirma:

En un proceso experimental nos enfrentamos con un objeto a ser estudiado y con un número de aparatos. Ambos, objeto y aparato pueden ser de diversos tipos. El proceso experimental involucra la *realización material* [*material realization*] y la descripción teórica, o interpretación de un número de manipulaciones de, y las consecuencias para, el objeto y el aparato, que han sido puestos en interacción. La idea general es que cierta información sobre el objeto puede ser transferida al aparato, por medio de una interacción *apropiada*. Esto es, la interacción debe producir una correlación (idealmente exhaustiva) entre alguna propiedad del objeto y una propiedad del aparato. De ello se sigue que la descripción teórica del objeto y del aparato también deben “interactuar”: deben tener al menos algún área de intersección. La teoría del electrón y las teorías de los instrumentos utilizados para experimentar con electrones no pueden ser completamente diferentes. [...]. En la etapa de *detección*, la información puede ser obtenida observando o midiendo la propiedad relevante del aparato. Un rasgo típico de la práctica experimental es que ni el objeto ni el aparato se encuentran “simplemente disponibles”. Deben ser cuidadosamente preparados de acuerdo con el objetivo y el plan del experimento. (Radder, 1995, p. 58).

La distinción que Radder establece entre la *realización material* y la *descripción teórica* del experimento será de suma utilidad para pensar el problema de la autonomía de la experimentación, que trataremos en la tercera parte de la tesis.

Finalmente, recuperando, pero a la vez trascendiendo las diferentes propuestas de los autores reseñados, podríamos afirmar que un experimento puede concebirse como un

dispositivo técnico-nomológico, esto es, una *realización material* (tomando el concepto de Radder) que, cuando es orientada a resolver preguntas específicas, produce *marcas*.¹¹ Estas marcas adquieren sentido por medio de un proceso de *retroceso inferencial*, que se articula apelando a un conjunto de leyes que permiten realizar la *descripción teórica*. Un grupo de estas leyes son las que están presupuestas en el diseño experimental, mientras que un subconjunto restante de leyes, a determinarse con posterioridad a los resultados obtenidos, serán las que otorgarán un sentido al *output* del experimento. Volveremos sobre este punto en el capítulo octavo tras haber analizado tres experimentos que harán las veces de base empírica de nuestra investigación.

2.2 Tipos de experimentos en ciencias naturales

Los experimentos en ciencias naturales pueden distinguirse según sus rasgos estructurales, tomando en cuenta su función o según el tipo de resultados que proporcionen. Según sus rasgos estructurales, los experimentos pueden ser materiales o no-materiales, estos últimos, a su vez, pueden ser mentales o virtuales.¹² El tipo de implementación o realización del experimento está, a su vez, correlacionada con su modalidad. En este sentido, los experimentos pueden ser actuales, contrafácticos o hipotéticos. Finalmente, considerando su función, los experimentos pueden proponerse para decidir entre hipótesis rivales (experimentos contrastadores); para constituir o expandir los límites de una teoría (experimentos exploratorios) o para procurar avances tecnológicos. Acerca de esta última forma de analizar a los experimentos, cabe destacar que nada impide que un mismo experimento cumpla las diferentes funciones simultáneamente o que, en retrospectiva, un experimento exploratorio permita una decisión entre teorías y un avance técnico.

Los experimentos materiales son aquellos en los que se crean y/o controlan las condiciones iniciales de los sistemas físicos que son el objeto de la investigación. En

¹¹ Que una realización material produzca marcas no es condición suficiente para caracterizar a un experimento. En efecto, un contador Geiger, abandonado en la zona de exclusión de Fukushima, produce marcas (sonoras), pero no califica como un experimento.

¹² La distinción entre experimentos materiales y no-materiales la formula Morgan (2003). Ella reconoce, además, un caso intermedio: los experimentos semi-materiales, que aquí no consideraremos.

este tipo de experimentos, las condiciones iniciales y los procesos físicos efectivamente ocurren. Hay dos modos paradigmáticos de conducir estos experimentos: en situación de campo o en situación de laboratorio. Los experimentos no-materiales, por su parte, pueden dividirse en dos sub-clases: los experimentos mentales y los experimentos virtuales. Los primeros son los conocidos *gedankenexperimente*, en los que las condiciones iniciales y la evolución de un sistema físico no son producidas realmente, sino sólo imaginadas. Los segundos están basados en simulaciones realizadas con computadoras, en los que se considera por hipótesis que las condiciones iniciales y las leyes operantes están operando, pero éstas no se ejemplifican en un sistema físico, sino en un simulador. Se asume, además, que las variables relevantes que afectan el sistema bajo investigación son recuperadas en la simulación. En otros términos, los experimentos virtuales ofrecen una simulación de lo que se considera podría estar ocurriendo en el sistema modelado.¹³ Los experimentos no-materiales, en su mayoría, se proponen frente a limitaciones tecnológicas que impiden el desarrollo de experimentos materiales.

Considerando ahora las funciones de los experimentos en ciencias naturales afirmaríamos que hay tres objetivos por los cuales un experimento puede llevarse a cabo: si bien todo experimento permite, de un modo u otro, expandir nuestro conocimiento, los experimentos exploratorios se conducen fundamentalmente con el objetivo de permitirnos conocer más acerca de un dominio dado, para crear o desarrollar una teoría científica; los contrastadores, por su parte, permiten efectuar decisiones respecto de las teorías científicas, en particular, elecciones o rechazos, y, finalmente, hay un subconjunto de experimentos cuyo objetivo es el de procurar avances no ya solamente epistémicos, sino tecnológicos.

Si bien los experimentos materiales y los no-materiales pueden cumplir las tres funciones que hemos señalado antes, no parece cierto que puedan cumplirlas con el mismo grado de satisfacción y hay razones por las cuales se lleva a cabo un experimento material en lugar de uno no-material o viceversa. Es decir, hay razones por las cuales, frente a cierto tipo de investigación, se privilegia un modo de investigación por sobre los restantes. Los experimentos virtuales, por ejemplo, son ideales para el

¹³ Existe, como mencionamos antes, una forma peculiar de simulación que Mary Morgan (2003) denomina: experimento semi-material. En esta clase de experimentos, que aquí no analizaremos, se conocen las condiciones iniciales de un sistema y se las carga en la simulación.

estudio de la evolución de un sistema a largo plazo, como es el caso de las consecuencias de diversos modelos cosmológicos dada la estipulación de ciertas condiciones iniciales. Las simulaciones denominadas *de Monte Carlo* son un ejemplo típico.¹⁴ En la cosmología, las simulaciones tienen un valor importante, permiten evaluar los diversos modelos cosmológicos y proponer nuevos parámetros que permitan ajustar el modelo con lo efectivamente observado (tal es el caso de la energía oscura, un parámetro aceptado en la mayor parte de las teorías cosmológicas actuales que fue postulado para poder reproducir, en la simulación, el estado del universo tal como es observado actualmente). Frente a la imposibilidad de un estudio directo de los modelos de evolución cosmológica, las simulaciones hacen posible evaluar si dadas ciertas condiciones iniciales propuestas desde el ámbito teórico para una serie de parámetros, en conjunción con valores determinados observacionalmente para otros parámetros, es posible reproducir lo observado actualmente en los mapeos astronómicos. Los experimentos virtuales también se muestran muy útiles en investigaciones biomédicas. Por ejemplo, Morgan (2003) refiere un caso en el que, con el fin de determinar la resistencia de la estructura ósea frente a la aplicación de fuerzas externas, se modeliza el esqueleto humano en una plataforma virtual tridimensional sobre la cual se *hacen correr* las leyes de Newton, y se obtienen consecuencias respecto de la aplicación de una fuerza en distintos sectores del esqueleto.

Los experimentos mentales, por su parte, se prefieren frente a imposibilidades técnicas o de principio y se emplearon con mucha frecuencia en el desarrollo de la física moderna y contemporánea, desde Galileo hasta Einstein. En el terreno de la mecánica cuántica abundaron, siendo fundamentales los propuestos por Einstein, Podolsky y Rosen, así como también el célebre gato de Schrödinger. También son célebres las experiencias mentales que propusieron Leibniz, Newton, Kant y, más tardíamente, Reichenbach para aportar razones a favor del espacio absoluto o relacional.¹⁵

Cabe la pregunta respecto del valor confirmatorio o disconfirmatorio de los experimentos no-materiales. Suele considerarse, especialmente en el caso de los

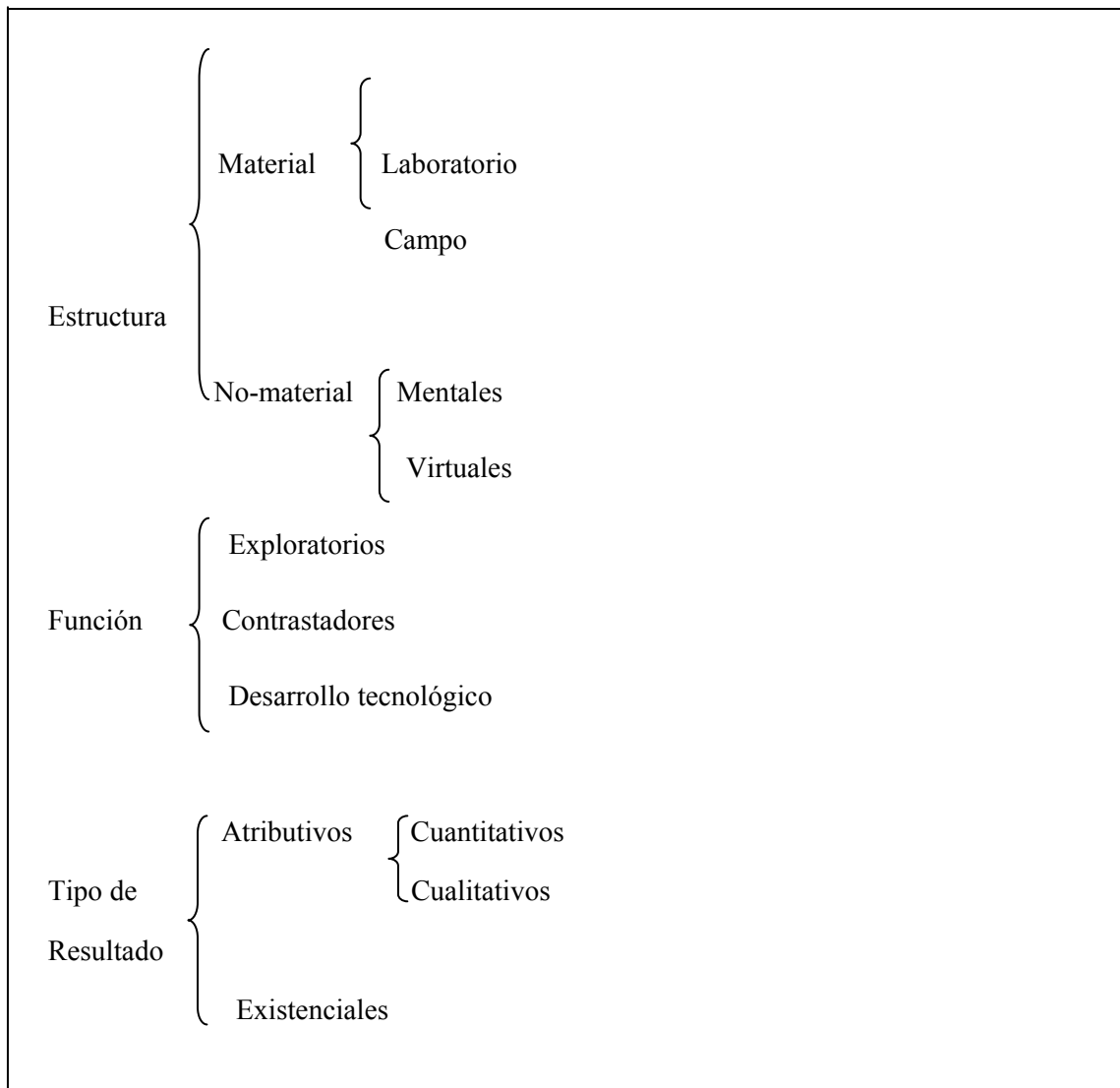
¹⁴ Sobre las simulaciones Monte Carlo hay un interesante desarrollo en Galison (1997) capítulo 8. Para la inmaterialidad en los experimentos virtuales, un análisis del proceso de extrapolación de los resultados de las simulaciones al comportamiento efectivo del objeto simulado y una tipología de experimentos virtuales puede consultarse Morgan (2003).

¹⁵ Para un estudio pionero sobre el valor epistemológico de los experimentos mentales puede consultarse Hacking (1992a). La estructura y función de los experimentos mentales se tratan con detalle en las monografías de Sorensen (1992) y Brown (2010); también es importante la compilación de Horowitz y Massey (Eds.), (1991).

experimentos virtuales, que funcionan tan sólo como herramientas heurísticas. Algunos autores, sin embargo, han considerado, por ejemplo, que las simulaciones son homomórficas con la realidad.¹⁶ Pero dado que una de las limitaciones más importantes de este tipo de experimentos es el no poder contemplar aquellas variables que, desconocidas para el investigador, podrían incidir en la evolución del sistema físico real, no se los considera elementos que por sí mismos y en ausencia de evidencia experimental adicional incidan de modo categórico en la aceptación de una teoría en el seno de la comunidad científica. Otra de las limitaciones de este tipo de experimentos reside en las dificultades de extrapolar los resultados de las investigaciones a los sistemas físicos concretos. Dicho en otros términos, el problema radica en la transición de los datos obtenidos a partir de la modelización de un sistema físico para la predicción del comportamiento del sistema físico real.

Finalmente, es posible diferenciar a cada uno de los experimentos según el tipo de resultados a obtener. Si la investigación se relaciona con la determinación de la existencia de una entidad o proceso se tratará de un experimento existencial, si la indagación está relacionada con la atribución de una propiedad a una entidad o proceso, se tratará de un experimento atributivo, sea éste cualitativo, o cuantitativo. Resumiendo, podemos encontrar los siguientes tipos de experimentos según los tres criterios propuestos:

¹⁶ Véase Galison (1997) cp. 8.



Esquema 2. Tipología de experimentos según criterios estructurales, funcionales y según sus resultados.

Friedrich Steinle (1997 y 2002) propone una tipología diferente a la mía, probablemente más sencilla, aunque suficiente para sus propósitos. Steinle considera que –en el marco de lo que denominé *experimentos actuales*- es posible distinguir dos tipos de experimentos que constan de presupuestos diferentes y que persiguen distintos propósitos epistémicos: los experimentos *exploratorios* y los experimentos *guiados por teorías*. Los primeros, afirma, son característicos de las instancias iniciales del desarrollo científico o de los momentos de revolución científica (cf. Steinle, 2002, pp. 422-423) y contribuyen al descubrimiento de regularidades empíricas. Dado que estos

experimentos –según Steinle- no presuponen marcos teóricos, estas experiencias son del orden de lo tentativo y contribuyen a delinear a las teorías científicas. En sus palabras:

La experimentación exploratoria típicamente comienza cuando ciertas categorías se desestabilizan, es decir, se muestran como inadecuadas para lidiar con los fenómenos. La experimentación entonces va de la mano con la revisión, la reforma y la re-estabilización de las categorías puestas en cuestión. (Steinle, 2002, pp. 422-423).

Los segundos, como su nombre lo indica, se realizan en períodos en los que las teorías ya se encuentran consolidadas. Si pensamos la distinción propuesta a la luz de la epistemología kuhniana, estos experimentos serían los más frecuentes en los períodos de ciencia normal. Dice Steinle:

Los experimentos guiados por teorías se realizan habitualmente teniendo expectativas claras respecto de los posibles resultados. Poco espacio queda para obtener resultados inesperados, el mismo diseño del arreglo experimental puede excluir estos resultados sorprendentes. (Steinle, 1997, p. S70).

Y ésta es la comparación que sugiere entre ambas categorías:

El contraste entre experimentación exploratoria y teóricamente dirigida [...] no sólo es notable respecto de los objetivos epistémicos (la búsqueda de regularidades vs. la contrastación de expectativas), sino también en el tipo de guías de la actividad experimental. Las guías inespecíficas de la experimentación exploratoria poseen un carácter metodológico, y dan lugar a una variedad de experimentos dispersos. Las categorías y los conceptos por medio de los cuales los experimentos son descriptos y organizados aparecen típicamente como consecuencia de las series experimentales, como su resultado. Los experimentos teóricamente guiados, por el contrario, poseen un orden –y más aún, una teoría formulada, aunque tal vez provisional- como precondition, y están en todos los detalles esenciales

determinados por dicha teoría. No una variedad de experimentos, sino un único y elaborado arreglo experimental es lo usual en estas situaciones. Una tercera diferencia se vuelve manifiesta en el tipo de instrumentos y aparatos utilizados. Los instrumentos para la actividad exploratoria tienen que permitir un gran rango de variaciones, así como estar preparados para una gran variedad de *outcomes*, inclusive aquellos inesperados. Las restricciones impuestas por el arreglo experimental no deben ser demasiado limitantes. Cuando se contrastan expectativas claras, por el contrario, los instrumentos están específicamente diseñados para un único efecto. Las posibilidades de variación son más acotadas, así como las chances de obtener *outcomes* inesperados. (Steinle, 2002, p. 422).

No es mi intención polemizar con Steinle, pero sí me interesa destacar los acuerdos y las diferencias con el autor. Existe entre nuestras propuestas un núcleo básico de acuerdo: ambos defendemos la idea de que la experimentación en ciencias naturales no consiste meramente en la puesta a prueba de una teoría. Existen experimentos que permiten, por ejemplo, la formación de conceptos, la determinación de valores para propiedades, etc. Pero lo anterior es independiente de la existencia o no de una teoría o más teorías que permitan dotar de sentido al *output* obtenido en cada experimento. Más aún, no parece correcto afirmar que en el marco de la investigación en ciencia normal no sea posible un resultado inesperado, ya que precisamente las anomalías son la cuota de sorpresa en el marco del trabajo bajo un paradigma. Tampoco su clasificación parece generar una partición clara. ¿Es el experimento de la refrangibilidad diferencial de Newton exploratorio o guiado por teorías? En un trabajo en coautoría con Neil Ribe afirma que dicho experimento es teóricamente guiado. (Ribe y Steinle, 2002), sin embargo, el experimento de Newton satisface todas las características que él atribuye a los experimentos exploratorios en el sentido que confiere al término. Por otra parte, ¿son los experimentos para la detección de ondas de gravedad exploratorios o guiados por teorías? Si bien satisfacen todos los criterios que Steinle propone para un experimento teóricamente guiado, los resultados no han dejado de generar muchísima polémica. Finalmente, entiendo que son los experimentos guiados por teorías aquellos que pueden permitir la contrastación, pero, a su vez, si tenemos en cuenta la afirmación de Steinle según la cual los experimentos guiados por teorías no generan resultados sorprendentes, entonces, ¿por qué realizarlos?, ¿para qué intentar una contrastación que no será tal?

Lo que me interesa, en resumen, destacar es lo siguiente: tanto los experimentos guiados por teorías como los experimentos exploratorios según el criterio de Steinle, son, bajo mi propuesta, experimentos exploratorios, independientemente de que presupongan teorías en la elaboración del arreglo experimental, en la individuación del *output* o en la interpretación de los resultados. Si el experimento se diseña con el propósito de poner a prueba una teoría, entonces, según mi clasificación estamos frente a un experimento contrastador. Como mostraré en los próximos capítulos, los experimentos están siempre guiados por presupuestos teóricos, sea en los comienzos de conformación de una teoría científica, como en las investigaciones realizadas bajo un paradigma.

En nuestro trabajo, y siguiendo las distinciones que ofrecimos, nos centraremos en los experimentos materiales de laboratorio. En especial nos interesaremos por los experimentos exploratorios. Habíamos mencionado que los experimentos exploratorios son, según su función, experimentos diseñados con el propósito de obtener conocimiento acerca del mundo físico y de expandir los límites de una teoría científica. Si bien es justo reconocer que, en retrospectiva, un experimento exploratorio bien puede propiciar una elección teórica e, inclusive, permitir desarrollos tecnológicos. Como ejemplo, podemos pensar en los experimentos en torno al entrelazamiento cuántico que si bien tienen como objetivo conocer más acerca de las entidades cuánticas, también podrían forzarnos a tomar decisiones teóricas (en caso de que las partículas entrelazadas efectivamente transmitan información de manera instantánea y, con ello violen la teoría de la relatividad especial) y, además, también podrían tener repercusiones en el ámbito práctico, especialmente en el área de las comunicaciones.¹⁷

¹⁷ Esto es sólo a título de ejemplo. De hecho en el entrelazamiento cuántico no hay transmisión de información, por lo tanto no violan la teoría especial de la relatividad. Un caso real en el que sí se cumplen las tres funciones, aunque no simultáneamente, es el experimento para determinar la desviación de la luz frente a cuerpos masivos, que, permitió confirmar la teoría general de la relatividad y, posteriormente permitió el desarrollo de la tecnología GPS.

2.3 Tipos de resultados experimentales

Habíamos indicado en la sección anterior que según la clase de información que se intentase obtener como resultado de una investigación, los experimentos podrían ser existenciales o atributivos. Los primeros intentarán detectar la existencia de una entidad o un proceso, mientras que los segundos buscarán determinar la posesión de una propiedad para una entidad o proceso ya conocido. Distinguiremos, además, dos formas de experimentos atributivos: los cuantitativos y los cualitativos.

Nos centraremos ahora en el contenido proposicional de los resultados que es posible obtener en un experimento. Como anticipé, nos dedicaremos aquí a los experimentos materiales exploratorios de laboratorio, por lo tanto, los ejemplos que ofreceré se circunscribirán a estos casos, sin embargo, la distinción entre tipos de resultados se aplica indistintamente a experimentos materiales, mentales y virtuales.

Comenzaremos analizando los experimentos exploratorios atributivos cuantitativos. Estos pueden pensarse como el núcleo fundamental de la investigación científica. Como parte de esta categoría subsumiré, por ejemplo, experimentos como la medición de la velocidad de la luz que llevara a cabo Michelson (sobre la que nos ocuparemos en el capítulo tres) y la determinación de la constante de gravitación universal atribuida a Cavendish. En este tipo de experimento se da por supuesta la existencia de una cierta entidad, proceso o evento. También se asume que la entidad, etc. posee una propiedad determinada. El objetivo de este tipo de experimento es el de determinar con cierto grado de precisión la cantidad de una magnitud que una entidad o proceso, contemplado en una teoría científica, posee. Por ejemplo, el hecho de que la luz tarda tiempo en propagarse había sido sugerido por Galileo. Sin embargo, el experimento que realizó no proporcionó un resultado confiable. Que la propagación de la luz no era instantánea se aceptó a partir de la medición indirecta de Röemer en 1676 estudiando los satélites de Júpiter, pero fue sólo con los trabajos de Fizeau (1849), Foucault (1850) y Cornu (1872) y Michelson (1880), entre otros, que se proporcionaron valores concretos para la velocidad de la luz. Este tipo de experimentos arrojan como resultado final una cantidad para una cierta magnitud, a la que se le asocia un margen de error calculado.¹⁸

¹⁸ El resto de los experimentos que sugeriré a continuación pueden presuponer la medición de una cierta propiedad cuantitativa que se hallará si existe otro tipo de propiedad cualitativa o en el caso de que una cierta entidad exista. Como ejemplo podemos pensar en un experimento que intente detectar la existencia de una partícula subatómica a

Los experimentos atributivos cualitativos, por su parte, son aquellos que tienen como objetivo determinar qué propiedades posee una entidad o proceso previamente descubierto. Por ejemplo, una vez que los neutrinos fueron detectados experimentalmente, se destinaron numerosos esfuerzos para determinar si acaso estos oscilaban o no lo hacían. Las investigaciones realizadas en Japón en el centro Superkamiokande son un ejemplo de estas investigaciones. También el experimento para determinar si el electrón poseía una unidad mínima de carga conducido por Millikan y el experimento del doble prisma de Newton son casos que ilustran esta categoría. En este tipo de experimentos se busca determinar y enriquecer el conjunto de propiedades que posee una entidad o un proceso. Estas propiedades pueden ser puramente cualitativas, en el sentido de que la posesión de la misma no puede ser representada en términos numéricos (oscilación); o, pudiendo ser representadas cuantitativamente, pueden ejemplificarse como magnitudes discretas (*espín*; unidad mínima de carga eléctrica) o como magnitudes continuas (masa).

En los experimentos atributivos cualitativos, el resultado del experimento consiste en la afirmación de que una nueva propiedad puede ser predicada respecto de la entidad o proceso estudiado. En algunos casos, especialmente si la propiedad detectada es una magnitud, un experimento atributivo cualitativo puede incluir la referencia al valor con el que la propiedad se instancia. En otros términos, un experimento cualitativo afirma que una propiedad se predica de una entidad o proceso, pero, además, puede incorporar la determinación del valor de la propiedad si ésta puede ser subsumida bajo un concepto métrico. Por ejemplo, en el experimento que Millikan realizó para determinar si existía una unidad mínima de carga, podremos afirmar que los electrones poseen una cierta magnitud –la carga- y que esta propiedad se instancia con un valor constante. En efecto, de acuerdo con Allan Franklin, cuando Millikan realizó esta experiencia, la cuestión de si los electrones poseían una unidad constante de carga, era una cuestión abierta. En sus palabras: “Las investigaciones previas respecto de la carga del electrón no habían podido establecer si acaso existía una unidad fundamental de electricidad” (Franklin, 2005, p. 183). Por consiguiente, en ese caso no sólo se afirmará que se ha descubierto

partir de la medición de la masa de dicha partícula o en la detección del *boson de Higgs* a partir de la frecuencia energética. Pero esto no es necesariamente un signo de que el experimento sea atributivo-cuantitativo, sino sólo de que se requiere una medición con propósitos ulteriores. Por ejemplo, en el caso de los experimentos atributivos cualitativos, si la propiedad que se intenta encontrar es absoluta, bien puede no requerirse una medición como parte del experimento. Es también posible que en los experimentos existenciales no resulte necesario apelar a una medición, como es el caso de la existencia de las células en tanto que constituyentes de los tejidos de los seres vivos.

una nueva propiedad que el electrón posee, sino además, el valor con el que dicha propiedad se instancia. En los experimentos cuantitativos, por el contrario, el hecho de que el sistema bajo estudio posee una cierta propiedad es un dato conocido previamente, y, por consiguiente, no es una pregunta a ser respondida por el experimento. Más aun, como veremos, los experimentos atributivos cualitativos pueden permitirnos conocer si un sistema posee o no una propiedad, como es el caso del experimento de Newton que estudiaremos en el capítulo cuarto, sin que se requiera para ello de una medición. Dadas estas posibilidades, no es correcto afirmar que los experimentos atributivos cualitativos son un subconjunto de los cuantitativos, por el contrario, los experimentos cuantitativos presuponen a los cualitativos. Valgámonos de un ejemplo sencillo al que nos referiremos con más detalle en el próximo capítulo. Cuando todavía estaba en discusión el modo de propagación de la luz, es decir si ésta se propagaba instantáneamente o si acaso poseía velocidad, Isaac Beeckman y posteriormente Galileo Galilei, diseñaron experimentos para determinarlo. Dado que la pregunta a responder en el experimento no era cuál es el valor de la velocidad de la luz sino si ésta poseía velocidad, estos experimentos pueden pensarse como atributivos-cualitativos. Ahora bien, tras la confirmación de la existencia de una cierta velocidad para la luz, Foucault, Michelson y otros buscan determinar el valor de esta propiedad, efectuando, entonces, un experimento cuantitativo.

Resta entonces ocuparnos de los experimentos existenciales. Estos tienen como meta determinar si un tipo de entidad o proceso existe o no. Habitualmente se realizan con el fin de encontrar la referencia para un concepto previamente introducido en el marco de una teoría científica. Como ejemplos, consideremos los intentos de Weber para detectar ondas de gravedad, cuya producción bajo ciertas condiciones había sido predicha por la teoría general de la relatividad. También la detección de neutrinos que realizaron Reines y Cowan es un caso de experimento existencial. Estos experimentos proporcionan resultados que pueden ser formulados como respuestas de tipo sí/no o como una afirmación de carácter existencial, de allí el nombre elegido. Los experimentos existenciales pueden involucrar una medición ya que en muchas situaciones, el modo de detectar la existencia de una entidad es por medio de la detección de una propiedad cuantitativa que la entidad deberá poseer necesariamente si existe o que deberá medirse en el diseño experimental si se ha detectado la presencia de una entidad o proceso en el arreglo experimental. Sin embargo, la afirmación final de un experimento existencial no

es, simplemente, una cantidad para una propiedad cuantitativa, sino la inferencia, a partir de dicha determinación, de la existencia o no de una cierta entidad o proceso.

En términos lógicos, las distinciones que realizamos quedan recuperadas por las siguientes formas lógicas:

(i) En el caso de un experimento existencial diremos que:

$$\exists(x) (\varphi(x))$$

En numerosas ocasiones afirmaremos lo anterior a partir de detectar que:

$$\rho(x) = n \text{ y de asumir que } \rho(x) = n \leftrightarrow \exists(x) (\varphi(x));$$

(ii) en el caso de un experimento atributivo cualitativo afirmaremos que:

$$\forall(x) (\psi(x) \rightarrow \varphi(x));$$

(iii) en el caso de un experimento atributivo cuantitativo afirmaremos que:

$$\exists(n) \in \mathbf{R} \wedge \forall(x) ((\varphi(x) \rightarrow \rho(x) = n)$$

Aquí se presupone tanto la existencia de la entidad que posee la propiedad cuantitativa como la posesión de la propiedad cualitativa asociada.

Hasta aquí, nos hemos referido al experimento, sus constituyentes, sus funciones y sus objetivos. Con las distinciones que hemos ofrecido estamos en condiciones de pasar al análisis de casos concretos.

Segunda parte: la base empírica

Los experimentos cuantitativos: Michelson y la velocidad de la luz

3.1 Los experimentos cuantitativos

En el capítulo II (§ 2.3) habíamos distinguido tres tipos de experimentos exploratorios según el tipo de resultado: los experimentos cuantitativos, los cualitativos y los existenciales. En este capítulo, nos dedicaremos a caracterizar con mayor precisión a los primeros, analizando un caso paradigmático: el primer intento de Albert Michelson para medir la velocidad de la luz.

Como parte de esta categoría subsumiré experimentos como el que estudiaremos a continuación y muchos otros, como por ejemplo el experimento de Cavendish para determinar la constante de gravitación universal, etc. Uno de los rasgos definitorios de este tipo de experimentos es que da por supuesta la existencia de una cierta entidad, proceso o evento a la par que se asume que la entidad, etc. posee una propiedad gradual o magnitud determinada. El objetivo de este tipo de experimento es el de establecer con toda la precisión posible, dados los condicionamientos técnicos, la cantidad de una magnitud que una entidad contemplada en una teoría científica posee. Por ejemplo, el hecho de que la luz tarda tiempo en propagarse había sido sugerido por Galileo. Sin embargo, el experimento que realizó no proporcionó un resultado confiable. Que la propagación de la luz no era instantánea se aceptó a partir de la medición indirecta de Røemer en 1676 estudiando los satélites de Júpiter, pero fue sólo con la medición terrestre de Fizeau, en 1849, que se propone un valor específico para la velocidad de la luz que, posteriormente, los experimentos de Foucault de 1863, de Cornu de 1872 y de Michelson de 1878, 1879 y 1882, etc. intentarán precisar (cf. Plá, 1947).

Este tipo de experimentos arrojan como resultado final una cantidad para una cierta magnitud, a la que se le asocia un margen de error calculado.

El resto de los experimentos que hemos distinguido, es decir, los experimentos atributivos cualitativos y los experimentos existenciales, pueden presuponer la medición

de una cierta magnitud que se hallará en el caso en que el objeto bajo estudio ejemplifique otro tipo de propiedad cualitativa o en el caso de que una cierta entidad exista (por ejemplo, para determinar la existencia de ondas de gravedad, el experimentador busca detectar la energía que transportaría la onda, en el caso de existir; sin embargo, la detección de energía no es un fin en sí mismo). De todos modos, esto no debe hacernos confundir un experimento cuantitativo con los restantes experimentos exploratorios que hemos distinguido. Un experimento cuantitativo tiene como finalidad la determinación experimental del grado con el que una propiedad se instancia. Los restantes experimentos, si presuponen una medición, lo hacen como un medio para alcanzar otro fin.

En este capítulo, nos concentraremos en un experimento cuantitativo en sentido estricto, es decir, uno en el que se presupone la existencia de una entidad con cierta propiedad gradual y cuyo objetivo es determinar el *cuánto* de la propiedad en estudio.

3.2 Michelson y la medición de la velocidad de la luz

3.2.1 Antecedentes

Los estudios sobre óptica comenzaron muy tempranamente, si bien asociados generalmente con el fenómeno de la visión. En el caso Aristóteles, él no sólo estudió a la luz en relación con nuestro sistema visual, sino que se ocupó de ella como un objeto de estudio en sí mismo. Afirmó, contra Empédocles, que la luz *no es un movimiento* y que su propagación era instantánea (cf. *De Sensu*, 446b 25-447a 10). Muchos siglos más tarde, todavía primaba la concepción de la propagación instantánea de la luz, y, por ejemplo, tanto Descartes como Kepler defendieron que la velocidad de la luz era infinita, y, por lo tanto no-mensurable.¹⁹ Sin embargo, en 1629, un contemporáneo de Descartes, Isaac Beeckman, ideó un experimento que sugería la velocidad finita de la luz, de rasgos similares al que posteriormente Galileo mencionará en la primera jornada de sus *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*. La historia de Beeckman es un tanto

¹⁹ Una excepción temprana es Alhazen, quien defendía que la luz requería tiempo para propagarse (cf. Sabra, 1981, p. 47).

curiosa. Fue considerado uno de los hombres más cultos de Europa en su tiempo y realizó numerosos descubrimientos científicos. Entre ellos, rechazó la teoría del *ímpetus* y sugirió la ley de inercia antes que Descartes y, desde luego, mucho antes que Newton. Estudió teología y medicina y defendió el atomismo. Habiendo notado que sustancias químicas de igual composición diferían en sus propiedades, sugirió que esto podía deberse a una disposición diferente de los átomos constituyentes de las moléculas, anticipándose con ello a la estereoquímica, disciplina que analiza la distribución espacial de los átomos que constituyen una molécula y la relación con sus propiedades químicas y físicas y que fue incorporada en el mundo científico por Louis Pasteur recién dos siglos más tarde. Sin embargo, el holandés es, prácticamente, una figura olvidada en la historia de la ciencia. En buena medida, esto se explica a partir de su renuencia a divulgar sus logros, reservando la comunicación de sus descubrimientos a los intelectuales de su época. Fue sólo después de su muerte cuando uno de sus hijos publicó algunos de los trabajos de Beeckman. Y, recién a comienzos del siglo XX se publican sus diarios, en una edición bilingüe latín-neerlandés que no favorece, precisamente, su difusión. Así relata su experimento Beeckman:

Los hombres no pueden indagar [sin más] a qué velocidad viaja la luz por el espacio. Porque ninguna medición que sea tan rápida como la de la luz puede ser efectuada. Así, mido la velocidad de la luz a través del sonido. Hoy, que es 19 de marzo de 1629, dejo constancia de lo que de modo alguno hubiera podido creer.

Dispuse a un hombre a varias millas de mí para que: 1) se colocara en la cima de un monte alto a gran distancia de mí, en plena oscuridad y sin que nada hubiera entre nosotros, para que cuando él hiciera detonar un explosivo yo pudiera ver el estallido de luz. Como es verosímil, se requiere un gran espacio para notar alguna diferencia temporal pues la luz se mueve con increíble celeridad. 2) Uno de los hombres tiene un exactísimo reloj portátil y el otro se sitúa tan lejos como puede para detonar el explosivo. Así, estando lejos y remotos, el uno dispara, y el otro en el momento en el que ve la luz lo apunta rapidísimamente según su reloj [...] y contabiliza el tiempo que transcurre entre que ve el destello y escucha el sonido. La experiencia se realizó numerosas veces. Me parece verosímil que no sea tanta la

velocidad de la luz, puesto que varias muescas del reloj transcurren entre el destello y la explosión. (Beeckman, 1905, p.112).²⁰

En principio, y por lo que puede seguirse de la descripción de su experimento, no se trata de una medición en sentido estricto, es decir, no se proporciona una velocidad para la luz, sino un intento de prueba de que la propagación de la luz no es instantánea. Así como el sonido requiere tiempo para propagarse, también la luz, posee una velocidad, que si bien es mayor, es finita. Lamentablemente, los recursos bibliográficos para profundizar en las investigaciones de Beeckman son escasos. Existe una carta –a la que no he podido acceder- dirigida a Descartes, en la que parece proponer una estrategia experimental diferente de la que había propuesto en su diario, al menos, a juzgar por la redesccripción que realiza Descartes en su respuesta, a la que sí es posible acceder. En una carta dirigida a Beeckman fechada el 22 de Agosto de 1634, Descartes escribe:

Prescindiendo de los elementos superfluos tales como el sonido, el martillo, etc., el experimento, tal como bien lo describe en su carta, es este. Alguien sostiene una antorcha en su mano al anochecer y la mueve en distintas direcciones; si observa un espejo situado frente a él a un cuarto de milla de distancia, será capaz de indicar si acaso siente el movimiento de su propia mano antes de verlo en el espejo. Tan confiado está Ud. del resultado del experimento que reconoce que su filosofía será falsa si el experimento mostrase que no existe una diferencia temporal observable entre el momento en el que el movimiento se percibe y el instante en el que éste es visto en el espejo. Si, por el contrario, dicho intervalo se detectase, he de admitir, que mi propio sistema filosófico se derrumbaría. (Descartes, carta a Beeckman, 22 de Agosto de 1634).

Si bien hay muchas interpretaciones respecto de las razones que llevan a Descartes a realizar una afirmación tan drástica, si recordamos que la filosofía cartesiana tiene su fundamento en el método para conducir adecuadamente la razón y si la ciencia es – tal como él lo pretendía- una parte de la filosofía, todo error al que lo conduzca la aplicación de su método mostraría, *simpliciter*, que no es un método adecuado –al

²⁰ Traducción directa del latín que agradezco a Lucía Prieto Castrillo.

menos no es infalible, como Descartes pretendiera- en la prosecución del conocimiento.²¹

Ahora con respecto a la descripción cartesiana de esta nueva propuesta de Beeckman, nuevamente se trata de una determinación de carácter cualitativo, que difícilmente haya arrojado alguna velocidad en concreto. En efecto, si se trata de un único sujeto que debe evaluar si hay una diferencia temporal entre dos percepciones, una kinestésica y otra visual, le resultará muy difícil cronometrar –en caso de existir- la diferencia entre la percepción del movimiento de la mano y la percepción de la imagen del movimiento de la mano en el espejo alejado. Si le resultase posible, aun existen dos problemas más, la corta distancia que recorrería la luz, que implica ser capaz de medir una diferencia temporal sumamente pequeña, y los tiempos de reacción del observador que no pueden desestimarse.

Luego del intento de Beeckman, fue Galileo quien propuso una nueva experiencia para determinar si acaso la luz requería tiempo para propagarse. En este caso, el experimento consiste en ubicar a dos hombres en un terreno llano, separados entre sí por una gran distancia. Cada uno de ellos portaría linternas. El sujeto A encendería su linterna y el sujeto B, encendería la suya cuando viese la luz proveniente de la linterna del sujeto A. *Ceteris paribus*, si A notaba alguna demora entre la emisión de su señal y la recepción de la señal luminosa proveniente de B, entonces se habría demostrado que la luz requiere tiempo para propagarse. (Aunque, nuevamente, por las características del experimento, no resultaría posible determinar cuánto tiempo exactamente, y, por lo tanto, cuál es la velocidad de la luz, sino sólo que la luz tiene velocidad, es decir que requiere tiempo para propagarse en el espacio).

En *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Galileo afirma no haber obtenido resultados concluyentes con su experimento:

Ciertamente no he realizado el experimento sino en pequeñas distancias, o sea de menos de una milla y no he podido tener la seguridad de si es instantánea la aparición de la luz opuesta; pero si no es instantánea, por lo menos es velocísima y

²¹ Sakelleriadis (1982) no coincide con mi interpretación; según él, las palabras de Descartes no deben tomarse literalmente, sino como un modo de contrarrestar la excesiva confianza que manifestaba Beeckman acerca de su experimento.

aun diría momentánea, y por ahora la compararía con el movimiento que vemos producirse en el resplandor del relámpago, visto entre las nubes a ocho o diez millas de distancia. Nosotros distinguimos el origen de esta luz, y podríamos decir el manantial y la fuente, en un lugar determinado entre esas nubes, pero inmediatamente se propaga con amplísima expansión entre las circundantes. Esto parece ser un argumento en favor de que esa propagación requiere algún tiempo, porque si fuese instantánea y no gradual, parece que no podríamos distinguir su origen, o su centro, por decirlo así, de sus repliegues y sus prolongaciones extremas. (1638, p. 75).²²

La experiencia de Galileo no adquirió, entonces, valor probatorio. Una de las razones era la pequeña distancia que separaba a los sujetos implicados en el experimento, como él mismo propone en sus diálogos.

Fue recién a fines del siglo XVII, con el aporte del astrónomo danés Ole Christensen Rømer, quien al estudiar los satélites de Júpiter halló una forma de calcular el tiempo que la luz tarda en propagarse, que pudo dirimirse si acaso la velocidad de la luz era infinita, tal como pretendían Descartes y Kepler, o si era finita, como afirmaba Galileo. Es un hecho notable –aunque bastante habitual en la historia de la ciencia– que frente a la ausencia de consenso, las mediciones indirectas y, entre ellas, especialmente las determinaciones astronómicas, sean las que permiten zanjar las discusiones en la física.

La medición indirecta que llevó a cabo Rømer fue un resultado fortuito a causa de su observación del satélite de Júpiter, Ío. Notó que los eclipses de este satélite no presentaban un período regular en el marco de un año terrestre. Rømer comprendió que este hecho podía explicarse apelando a dos premisas: 1) Que la distancia entre la Tierra y Júpiter varía a lo largo del año (algo que ya se conocía, desde luego). 2) Que la luz no se propaga de manera instantánea, de modo que, a mayor distancia entre ambos planetas, mayor tiempo se requiere para visualizar el fenómeno del ocultamiento de Ío desde la Tierra.

Los historiadores de la ciencia no llegan a acordar en cuál es el valor de la velocidad de la luz según el astrónomo. En efecto, en sus trabajos, no indica un valor preciso, sino que afirma que ésta requiere unos 22 minutos extra en caso de la máxima

²² 1 milla = 1,609344 Km.

distancia entre Júpiter y nuestro planeta (cf. Boyer, 1941, p. 28). Sin embargo, conociendo con cierta precisión las distancias entre Júpiter y nuestro planeta en los momentos de máximo acercamiento y máximo alejamiento, el cálculo podría haberse efectuado con facilidad.

Alcanzado el consenso respecto de la propagación finita de la luz, comenzaron a sugerirse experimentos de carácter terrestre para determinar su velocidad. Estos experimentos se realizaron especialmente en Francia, durante el siglo XIX. Hasta 1877, año en el que Michelson realiza su primera medición, los resultados obtenidos eran, al menos en algún sentido, discordantes.

En 1849, Armand Hippolyte Fizeau conduce uno de los primeros experimentos cuantitativos que se conocerá luego como el *método de la rueda dentada*. El arreglo experimental consiste en un foco luminoso que emite luz hacia una rueda dentada que gira a una velocidad constante (algo que no pudo lograrse en sentido estricto) pero regulable por el experimentador y un espejo que refleja el haz de luz hacia el puesto de observación. Dado que el haz de luz debe atravesar en dos oportunidades la rueda dentada, puede suceder que, en su trayecto, ésta atraviese primero una zona de vacío (es decir un espacio *interdental* de la rueda), y, luego, en su trayecto de regreso al puesto de observación, se encuentre con un diente. En ese caso, el observador detectaría la disminución de la iluminación en el puesto de observación. Dado que el investigador conoce tanto la longitud del trayecto recorrido por la luz como la velocidad de rotación de la rueda y la proporción entre dientes y espacios de la rueda, es posible calcular la velocidad de la luz. El experimento de Fizeau proporcionó un valor de 313.300 Km/s. Por su parte, la medición de León Foucault a partir de la técnica del espejo giratorio que describe brevemente en una comunicación a la Academia Francesa de Ciencias en 1863, y que sólo resumiremos brevemente ya que es muy similar al experimento de Michelson que describiremos en extenso a continuación, arrojaba un valor de 298.000 Km/s. Finalmente, en 1872 Marie Alfred Cornu también incursionó en la medición de la velocidad de la luz perfeccionando el método que propusiera Fizeau. Efectuó cálculos y correcciones para determinar más precisamente la velocidad de rotación de la rueda; modificó la forma de los dientes y espacios interdentes y logró que se produjese un eclipse total (en el dispositivo) cuando la luz se topaba con un diente en su trayecto. Con estas mejoras, su experimento proporcionó el valor de 300.400 Km/s \pm 300 Km/s (Cf. Plá, 1947, p. 120). Los diferentes experimentos entonces, no llegaban a

coincidir –al menos en algunos de los casos mencionados- siquiera en la primera cifra significativa.

Dada la divergencia entre las mediciones efectuadas, Albert Michelson recupera el diseño experimental de Foucault e introduce algunas modificaciones para mejorar la precisión de la medición. El arreglo que propusiera Foucault se popularizó bajo el nombre de “método del espejo giratorio” y, a su vez, está inspirado en un dispositivo que creara Charles Wheatstone para medir la velocidad de la electricidad. En este caso se trata de medir la velocidad de la luz a partir de un dispositivo con dos espejos, uno fijo y otro capaz de rotar a una velocidad angular conocida y constante. Si se envía una señal luminosa desde el espejo fijo al espejo móvil, este último reflejará y proyectará la luz en el espejo móvil pero a una distancia x respecto de la señal inicial. Con los datos necesarios, es decir, la distancia entre los espejos, la velocidad de rotación del espejo giratorio y la distancia entre las señales luminosas, resulta posible calcular la velocidad de la luz. Sin embargo, dado que la intensidad de un haz de luz disminuye con la distancia, existían ciertos límites en la precisión que podía lograrse con el dispositivo de Foucault. Una dificultad que Michelson resolverá con su propuesta (cf. Lequeux, 2008, cp. 4).

Albert Michelson, en su experimento de 1877 (cf. 1880), reubicó el sistema de lentes y espejos con el propósito de ampliar la desviación del haz de luz, producto de la rotación del espejo giratorio.²³ Si era posible aumentar esta desviación sin pérdida de intensidad lumínica, afirmaba Michelson, entonces podría obtenerse un valor más preciso. En las próximas páginas, el análisis del diseño experimental y de los supuestos teóricos que lo posibilitan nos permitirá comprender por qué el aumento de la desviación era relevante y detectar ciertos elementos en el marco del experimento que nos permitirán más adelante, proponer un modelo de interpretación de la evidencia empírica y analizar, con éste, la tesis de la autonomía de la experimentación.

²³ Para una descripción exhaustiva del diseño experimental véase Michelson (1880) y también Newcomb (1891). Para una introducción a los experimentos de Michelson y a su vida, puede consultarse Jaffe, (1963), Livingston (1973) y también Millikan (1938); para un estudio de las diversas mediciones de la velocidad de la luz véase Plá (1947); para un tratamiento histórico y filosófico de la óptica física Mach (1913) es una obra clásica; y para informarse acerca del estado actual del conocimiento puede acudir a Hecht (2000).

3.2.2 El primer experimento de Michelson

En 1877, Albert Michelson comienza, como parte de sus actividades en la Academia Naval de los Estados Unidos –aunque con financiamiento privado (cf. Michelson 1880)- a optimizar el diseño que concibiera Foucault para medir la velocidad de la luz. Su artículo incluye una brevísima introducción de Simon Newcomb, Superintendente del *Nautical Almanac Office* (NAO), en la que éste destaca la relevancia de una nueva determinación de la velocidad de la luz en el marco de las actividades de la Marina de los Estados Unidos:

La posibilidad de que dispongamos de un método más preciso para la determinación de la paralaje solar a partir de la medición de la velocidad de la luz, nos conduce a aceptar este trabajo como parte de esta serie, entendiendo que contribuye a nuestro conocimiento de los movimientos celestes. (Michelson, 1880, p. 111).

La Academia Naval y la NAO, de la que Simon Newcomb, como anticipamos, era el responsable, estaban sumamente interesadas en mejorar los valores de ciertos parámetros fundamentales para lograr predicciones más precisas que serían relevadas en el *Almanaque náutico* de los Estados Unidos. Al respecto, nos cuenta Newcomb en su autobiografía, *The Reminiscences of an Astronomer* (1903):

La expresión ‘almanaque náutico’ es una expresión incorrecta para lo que es, en sentido estricto, la efeméride astronómica. Se trata de un extenso volumen, a partir del cual, el mundo obtiene todo su conocimiento acerca del tiempo y las estaciones, los movimientos de los cuerpos celestes, las posiciones pasadas y futuras de las estrellas y los planetas, eclipses y todos los fenómenos celestes admiten predicción. Es la base a partir de la cual el almanaque hogareño se elabora. También contiene los datos necesarios que posibilitan que el astrónomo o el navegante determinen su posición sea en la tierra como en el mar. La primera publicación de esta clase, preparada por Maskelyne, astrónomo real, un siglo atrás, fue pensada especialmente para el uso de navegantes; de allí también el nombre. (Newcomb, 1903, p. 62).

Y, en su artículo de 1891, *Measures of the Velocity of Light*, afirma:

La determinación [de la velocidad de la luz] que estamos comentando tiene su origen en 1867. En *Investigaciones de la distancia del Sol*, publicada en ese año, se presentan algunos comentarios al método de Foucault y se señala la importancia para determinar la paralaje solar de la repetición de la medición de Foucault a mayor escala, con un reflector fijo ubicado a una distancia de unos tres o cuatro kilómetros.

Desde ese momento en adelante, el tema atrajo la atención de los físicos americanos, muchos de los cuales planificaron con mayor o menor grado de detalle, la ejecución de los experimentos. Dado que, llegado el año 1878, no se habían logrado resultados considerables, en abril de ese año llevé el tema frente a la Academia Nacional de Ciencias. [...]

En ese mismo período, me llegó la noticia de que Mr. Michelson había comenzado los preparativos para repetir la determinación de Foucault, financiando con sus propios recursos la empresa, logrando ubicar el reflector a una distancia considerable. (Newcomb, 1891, p. 120).

También Newcomb nos proporciona otro dato relevante acerca del interés que suscitaba conocer con precisión el valor de la velocidad de la luz y de la importancia que tenía en el ámbito en el que Michelson se estaba formando. Permitía efectuar cálculos más precisos con un presupuesto más restringido. Relata Newcomb que, habiendo el congreso de los Estados Unidos aprobado una partida presupuestaria para obtener un registro fotográfico del paso de Venus en 1974, él se mostró en desacuerdo, básicamente porque, según su criterio, los datos obtenidos no serían lo suficientemente confiables como para permitir estimar con mayor precisión la distancia al Sol. Algo que, por diversas razones, fue confirmado. En sus palabras:

Luego de que las distintas comitivas regresaran a sus países, no les tomó mucho tiempo a los astrónomos darse cuenta que el resultado de la expedición era decepcionante, al menos en lo que a la determinación de la distancia del Sol se refería. Quedó claro que este dato tan importante podría haber sido medido mucho

mejor determinando la velocidad de la luz y el tiempo que requiere para alcanzarnos desde el Sol que tomando en cuenta el tránsito de Venus. (Newcomb, 1903, p. 173).

El desafío de Newcomb de mejorar el arreglo de Foucault se había puesto en marcha. Michelson había culminado su formación en la Academia Naval y, mientras se encontraba en tierra firme, se dedicaba a enseñar química y física en dicha institución. Preparando una clase, compara las distintas estrategias y los valores obtenidos y, deteniéndose en el método del espejo giratorio de Foucault, nota que es capaz de mejorar el diseño y, con ello, obtener una medición más precisa (cf. Carter y Carter, 2002, p. 405). Un logro como ese no es menor en el ámbito en el que se desempeña y a sus 25 años. Michelson introduce tres modificaciones en el diseño original que resultan fundamentales para realizar una medición más precisa: utiliza una lente esférica de gran distancia focal (L), ubica el espejo giratorio (R) en el punto focal de la lente y sustituye el espejo esférico del arreglo experimental de Foucault por un espejo plano (M).

Dado que la intensidad de un rayo luminoso es inversamente proporcional a la distancia recorrida por el haz de luz,²⁴ uno de los problemas en la experiencia de Foucault es la pérdida progresiva de intensidad del haz, algo que Cornu ya había señalado al diseño original de León Foucault. Michelson recupera esta objeción reconociendo: “La desviación [del haz luminoso] era demasiado pequeña como para ser medida con el grado de precisión necesario.” (Michelson, 1880, p. 116). La combinación de espejos, lentes y de sus posiciones relativas que propone Michelson permite superar el problema de la pérdida de intensidad (agregando una lente cóncava en el dispositivo) y, por lo tanto, permite aumentar la distancia entre los espejos R y M, lo que a su vez hace posible una mayor desviación del haz de luz y una medición mucho más precisa.

²⁴ Es Kepler quien por primera vez enuncia la ley según la cual la intensidad de una fuente luminosa varía con el cuadrado de la distancia (Cf. Mach, 1913). En la actualidad la intensidad recibe el nombre de *irradiancia* (Cf. Hecht, 2000, p. 49).

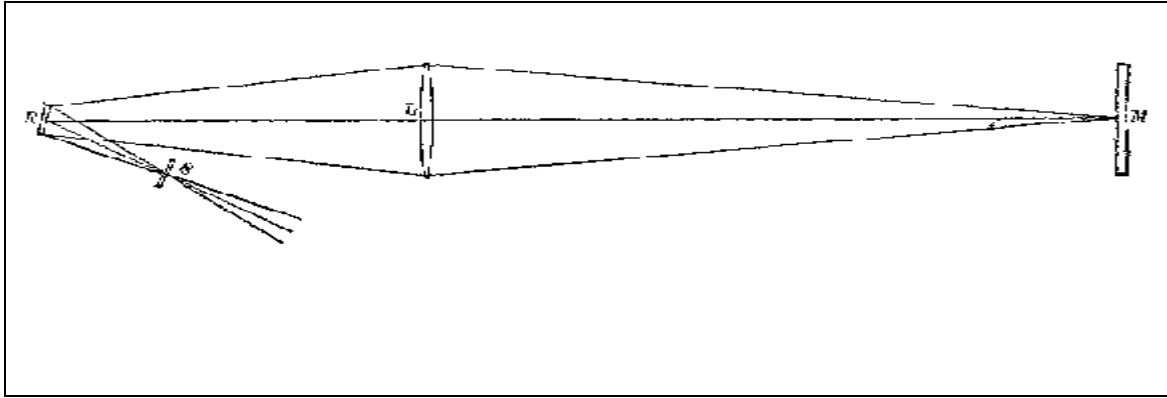


Figura 1. Esquema del arreglo experimental. (Adaptada de Michelson 1880)

La idea rectora que guía al experimento es la siguiente: si se envía un haz luminoso desde la fuente (y receptor) S al espejo R, que atraviese la lente L haciendo foco en el centro de M y si R se encuentra en reposo, por la ley de reflexión, el haz de luz incidirá en el espejo M y regresará, primero a R y finalmente al punto de partida, S. Ahora bien, si R comienza a rotar sobre su eje, (en la figura 3, la rotación ubicaría a R en una posición normal respecto del plano del papel), y si esta rotación es lo suficientemente rápida, se formará en S un nuevo punto luminoso, desviado respecto del original, en la dirección de la rotación de R. La desviación del segundo punto luminoso respecto del primero, se producirá en la dirección de rotación del espejo giratorio y coincidirá con el doble de la distancia angular que realizó el espejo giratorio, en el tiempo que requirió la luz para recorrer el doble de la distancia entre los espejos, es decir, el trayecto RM-MR (Cf. Michelson, 1880).²⁵ La figura 4 ilustra cómo la variación en la posición de R genera un nuevo punto luminoso en S'.

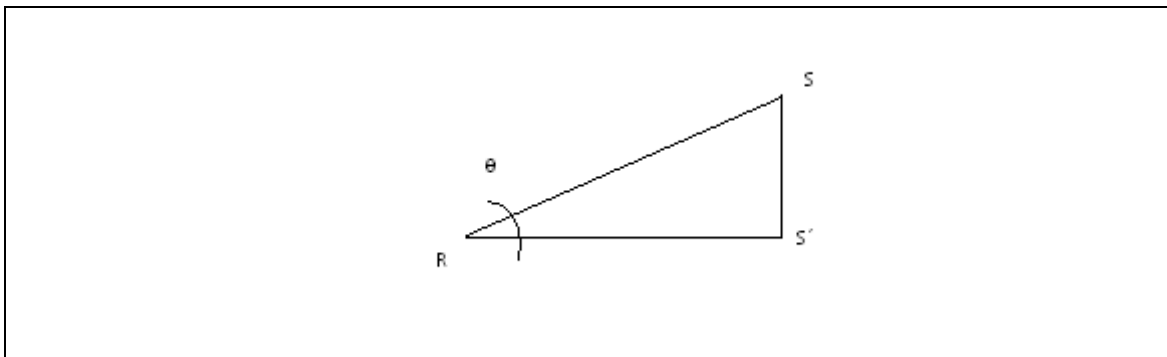


Figura 2. Θ , el ángulo de desviación.

²⁵ La distancia RM (luego de una serie de correcciones) es 1986,23 pies, o 605.40 metros (Cf. Michelson, 1880, p. 128). En sentido estricto, debería hablarse del trayecto SRM-MRS', sin embargo, la distancia S-R y R-S' es despreciable y no modifica los resultados.

El ángulo $S'R S$, que denominaremos θ es, en este experimento, el ángulo de desviación, es decir, el ángulo subtendido por los haces de luz que tienen como origen el espejo giratorio. Ese ángulo, es la mitad del ángulo en el que el espejo rotó, desde el momento en el que el haz de luz partió desde S, hasta que llegó a M y regresó a R. Conocer el valor de θ es -como veremos a continuación- la clave de este experimento. Si conocemos la longitud del segmento $S'S$ y del segmento $S'R$ resulta posible calcular la tangente de θ . Ahora bien, calculando la función inversa de la tangente de θ , es decir, el *arco tangente*, podemos obtener el valor de θ en radianes. Una vez obtenido este valor, se lo divide por dos, y ese es el valor del ángulo de rotación del espejo giratorio. Conociendo ahora el ángulo en el que el espejo rotó -si además conocemos la cantidad de revoluciones por segundo del espejo- resultará posible calcular la velocidad de la luz. Michelson controló esta variable estroboscópicamente. En efecto, para medir la velocidad de rotación de R y controlar que ésta permaneciera constante en la toma de datos, Michelson utilizó un diapasón al que mantenía en una vibración de 128 revoluciones por segundo gracias a una turbina. El diapasón poseía un pequeño espejo en una de sus horquillas y estaba ubicado de modo tal que reflejaba la luz del espejo giratorio sobre un vidrio en el observatorio del dispositivo. Cuando el espejo rotatorio (R) se encuentra en movimiento y las revoluciones que realiza coinciden con las oscilaciones del diapasón, el espejo de este último produce una imagen única en el puesto de observación. Si las oscilaciones son diferentes, las imágenes son múltiples y ello indica que el espejo giratorio debe ser regulado.

Finalmente, si sabemos que la velocidad es el cociente entre distancia y tiempo, la distancia que recorre la luz es $2RM$ y el tiempo está representado por $T = (\theta/2)/360n$,²⁶ estaremos en condiciones de obtener la siguiente ecuación:

$$V = \frac{2 \times 360 n \times 2 RM}{\arctan(S'S/RS')}$$

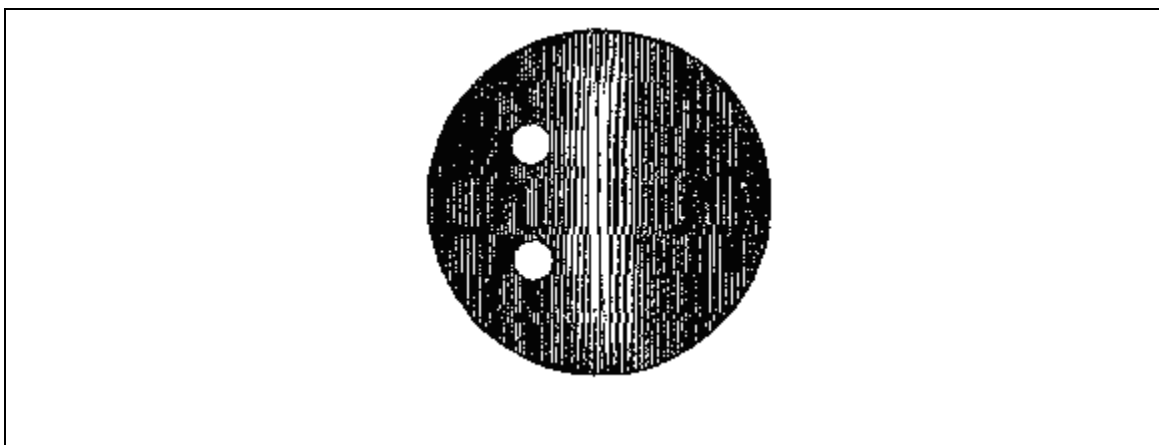
²⁶ La fórmula se obtiene por lo siguiente:

$$\begin{aligned} v &= n = \text{ciclos por segundo;} \\ 360 v &= \text{ángulo/tiempo} \\ T &= \text{ángulo} / 360 v \\ \text{Finalmente, si el ángulo que nos interesa es } \theta/2, \text{ entonces:} \\ T &= (\theta/2) / 360 n \end{aligned}$$

Ahora que poseemos una idea general del experimento estamos en condiciones de analizar los distintos pasos interpretativos que tienen lugar en el mismo.

3.3 La interpretación de los resultados

En primer lugar debemos preguntarnos: ¿cuál es el evento directamente perceptible que proporciona el experimento? Es decir ¿cuál es el *output* en el arreglo experimental de Michelson? Lo reproducimos a continuación:



**Figura 3. El *output* del experimento. (Magnificado)
Reproducido de Michelson (1880)**

Ahora bien, difícilmente esta imagen indique, cuando es tomada en sí misma, algo acerca de la naturaleza de la luz y de su rapidez. Estos puntos que podemos ver cuando se pone en funcionamiento el arreglo experimental, algo que podrá percibirse independientemente de todo cambio teórico -y cuyo valor como hecho observado sólo será cuestionado en el caso de detectarse un error de carácter técnico en el diseño experimental- son silentes respecto del problema que guía al experimento. Esta imagen es neutral y es autónoma sólo en virtud de que no proporciona por sí misma información alguna sobre la velocidad de la luz. Es sólo cuando estos puntos son interpretados como algo más, cuando se establece una relación entre los mismos, que pueden ser informativos, y ello supone un primer momento de carga teórica. Dados entonces los dos puntos luminosos S y S', Michelson ubica un micrómetro en el plano de la recta que los une y procede a efectuar la medición de la distancia entre los mismos. Ya no serán

los dos puntos, sino la distancia entre ellos aquello que resultará relevante en el experimento. Éste es, entonces, el primer momento de atribución de significado al *output*, un *output* que, podríamos afirmar, deviene *dato*.

Desde luego, cabe la pregunta respecto de por qué, dado el conjunto de relaciones que podemos establecer entre esos dos puntos luminosos, reparamos en la distancia entre ellos, y no, por ejemplo, en las diferencias de brillo, las diferencias entre sus radios, etc. Decir que, dados los objetivos del experimento, la distancia es la relación relevante es insuficiente, esto debe ser precisado. Debe poder explicarse por qué es relevante. En este caso, como habíamos anticipado, la distancia entre los puntos es aquello que permitirá calcular la tangente del ángulo cuyo vértice es el centro del espejo giratorio. Y este dato permitirá relacionar el desplazamiento del espejo y el tiempo que transcurre hasta la producción de la segunda imagen o segundo punto luminoso, S'. En esta instancia de la interpretación, el *output*, al pasar a *dato*, se ha cargado –en principio– con dos teorías de carácter formal: con una teoría de la medición, que establece que entre S y S' hay determinada longitud y con una rama de la geometría: la trigonometría, que informa que el segmento S-S' es la tangente del ángulo θ .

Ahora bien, en una etapa posterior, el valor de la longitud medida es incorporado en una ecuación que relaciona las diferentes variables del experimento y que permite, finalmente, calcular la velocidad con la que la luz realizó el recorrido entre los dos espejos del dispositivo. Se produce con ello un nuevo momento en la interpretación, pero, esta vez, las teorías implicadas no son formales, sino empíricas, más específicamente, se trata de teorías físicas y, dado que estamos calculando la velocidad, el dato resultante dependerá de la adecuación de la teoría cinemática presupuesta para realizar el cálculo.

Pasemos ahora de la producción de los datos del experimento a la reducción de los mismos a un único resultado por medio de la aplicación de algún método estadístico. Esta reducción conlleva un nuevo proceso de carga teórica, esta vez a partir de una teoría estadística, y, por lo tanto, también de carácter formal. En este caso, Michelson realiza un cálculo de las distintas fuentes de error del experimento; calcula la media de las mediciones y la desviación estándar y obtiene como resultado final el siguiente: $V = 299944 \pm 51$ km/s (cf. Michelson, 1880, p. 141). Cabe destacar que el científico descarta dos mediciones por considerarlas mal realizadas.

El valor que ofrecemos contempla la corrección en el vacío que, en este caso, se calculó de manera teórica:

La corrección para la velocidad de la luz en el vacío se obtiene multiplicando la velocidad en el aire por el índice de refracción del aire, a la temperatura en la que los experimentos se realizan. El error por obviar consideraciones acerca de la presión atmosférica es despreciable. Esta corrección, en kilómetros, es +80. (Michelson, 1880, p. 141).

¿Qué podemos inferir respecto de la conformación de los resultados experimentales en el caso de los experimentos atributivos cuantitativos tomando como ejemplo la determinación *michelsoniana* de la velocidad de la luz?

En primer lugar hay un pasaje de lo material a lo interpretativo, es decir, hay una interpretación que se sustenta en la realización material específica. El *output* es un indicador mediato de la velocidad de la luz en la medida en que éste se vincula con las leyes y presupuestos teóricos que rigen el accionar del dispositivo construido. El *dato*, por su parte, se configura a partir de un elemento saliente del *output*, cuya relevancia queda también determinada por las características del dispositivo diseñado. Habíamos mencionado que el *dato* sobre el que íbamos a calcular la velocidad de la luz era, en este experimento, la longitud del segmento determinado por dos puntos de luz. Este *dato*, a su vez, será reinterpretado como un indicador de algo más, por medio de una *interpretación interna* que, en este caso, proporciona el marco conceptual necesario para pensar el experimento en términos de velocidad. Dado que se trata de un experimento atributivo-cuantitativo, y, por lo tanto de la determinación del cuánto de una propiedad gradual, se requerirá un análisis estadístico apropiado y, finalmente, ya que el que la luz posea una cierta velocidad no es compatible con todas las teorías acerca de su naturaleza, el conocimiento experimental obtenido será subsumido bajo una teoría que sea capaz de acomodar el resultado obtenido, este último paso interpretativo es el que denominaremos *interpretación externa*.²⁷

²⁷ Como afirmamos en el capítulo II, los resultados experimentales de un experimento atributivo cuantitativo presuponen el contenido proposicional del resultado experimental que introduce la propiedad gradual cuyo grado especifica el experimento atributivo-cuantitativo. Por lo tanto, podríamos decir que éste *hereda* la *interpretación externa* del experimento cualitativo asociado. En este caso, no se tratará de subsumir el resultado bajo una teoría que explique por qué la velocidad de la luz es la que es, algo que tal vez sea un hecho último de la naturaleza. Retomaremos este punto en el capítulo VIII.

Los experimentos atributivos-cualitativos: Newton y la composición de la luz blanca

4.1 Los experimentos atributivos-cualitativos

Habíamos señalado en el capítulo II (§ 2.3) que los experimentos atributivos-cualitativos son aquellos cuyo objetivo es determinar qué propiedades posee una entidad o proceso. Son experimentos que, habitualmente, están ligados a la conformación de conceptos científicos y la introducción de propiedades para entidades o procesos ya conocidos. Averiguar si la luz se polariza, si es simple o compuesta, si los neutrinos poseen masa, si oscilan, son inquietudes que motivan la realización de experimentos atributivos-cualitativos. En estos casos, el resultado experimental no será un valor numérico, sino una respuesta por sí o por no respecto de la pregunta planteada como inicio de la investigación o bien una proposición en la que se predica de una entidad o proceso, la posesión de una propiedad. Dado que no se trata aquí de asignar con qué intensidad o cantidad se instancia una magnitud, no encontraremos un análisis estadístico propiamente dicho, sino que notaremos la necesidad de estabilizar el fenómeno detectado y una serie de estrategias que se implementan para determinar que éste no es meramente un artefacto.

Podemos preguntarnos si hay alguna relación entre las formas de experimentos atributivos que distinguí: cuantitativos y cualitativos. Si la respuesta es afirmativa, podemos preguntarnos, a su vez, en qué consiste esta relación. En primer lugar, los experimentos cuantitativos presuponen conceptual y lógicamente de los experimentos cualitativos en el sentido en que son estos últimos los que nos advierten de la existencia de una cierta propiedad. Por ejemplo, si Michelson se hubiese conformado con notar la distancia no-nula entre los puntos que conforman el output del experimento que comentamos en el capítulo anterior, y si con ello hubiese afirmado: “el desplazamiento

de la luz no es instantáneo” o “la luz requiere tiempo para propagarse”, hubiésemos estado frente a un experimento cualitativo.²⁸ Podemos decir, entonces, que los experimentos cuantitativos, que se ocupan de la determinación de magnitudes discretas y continuas, presuponen conceptualmente a los experimentos cualitativos que determinan que una entidad o proceso posee una propiedad determinada.

4.2 Newton y la composición de la luz blanca

La óptica es, probablemente, una de las disciplinas científicas que más tempranamente se desarrolló. La óptica geométrica, en particular, experimentó un avance sostenido desde Euclides hasta la modernidad. Cuando Newton comienza sus estudios en óptica, éste dispone de un corpus teórico abundante sobre el cual trabajar. Una de sus proezas en el área, al menos a mi juicio, consiste en el experimento que estudiaremos a continuación, en el que Newton apela a la óptica geométrica para avanzar sobre la óptica física, es decir, apelando a propiedades matemáticas de los rayos lumínicos, intentará descubrir propiedades intrínsecas de la luz, extendiendo, con ello, nuestro conocimiento acerca de su naturaleza.

Tradicionalmente se consideraba que la luz blanca era simple,²⁹ entendiéndose por esto que era homogénea. El fenómeno del color, por lo tanto, se explicaba en términos de la modificación de la luz. Por ejemplo, según Aristóteles, el color es producto de la mezcla de la luz blanca con superficies opacas (cf. Hackfoort, 1995, p. 11). Dependiendo de la oscuridad de las mismas, sería el color resultante. Muchos siglos más tarde, también Descartes se pronunció a favor de una teoría modificacionista, pero en su caso, en términos mecanicistas. Dicho de otro modo, para Descartes, los colores eran producidos por cierta tendencia al movimiento de las partículas constituyentes de la luz blanca (cf. Hackfoort, 1995, p. 12). Newton se opondrá a ambas concepciones

²⁸ Si bien esto es correcto en un sentido conceptual, históricamente y como mostramos en el capítulo anterior, la medición de Michelson se realiza con el objetivo de precisar el valor de la velocidad de la luz y no de establecer que la luz posee velocidad.

²⁹ Evito utilizar la expresión “sustancia simple” en pos de la neutralidad teórica. Tanto los defensores de teorías corpuscularistas como ondulatorias coincidían en la homogeneidad de la luz blanca. Pero el término *sustancia* conviene únicamente a la concepción corpuscular.

respecto del color.³⁰ Propondrá que la luz blanca no es simple, sino que es el resultado de la unión de rayos de luz simples, de colores invariables, cada uno de los cuales posee una refrangibilidad característica, un concepto que Newton define, en su *Óptica*, como la disposición de los rayos de luz a ser refractados al pasar de un medio transparente a otro (cf. *Optics*, P. 1, def. 2).

Si bien la historia de la ciencia recordará a Newton como el autor de este descubrimiento, no será, sin embargo, el primero en proponer tal hipótesis. Tal como afirma Lohne (1968), es el filósofo Marcus Marci, de Bohemia, quien ya había afirmado en 1648 que cada color posee una refracción específica y quien, además, había realizado un experimento similar al que Newton describirá en su carta a la *Royal Society*. Sin embargo, advierte Lohne, es muy probable que Newton no estuviese familiarizado con dicha obra.

Cuando en 1665, la *gran peste* azota Inglaterra y la Universidad de Cambridge debe cerrar sus puertas, Isaac Newton se refugia en su casa materna en la campiña inglesa donde llevará a cabo muchos de los experimentos ópticos que aparecerán luego en sus obras. En 1671, teniendo sólo 29 años, Newton envía su primer aporte a la *Royal Society of London*, una notificación que formará parte de las *Philosophical Transactions* titulada: *New Theory about Light and Colours*. Allí presenta una serie de experimentos que buscarían dar cuenta de la composición de la luz blanca en términos de los haces de luz de color que la constituyen y que poseen un comportamiento diferencial que está correlacionado con el color que exhiben.

Tanto la refracción diferencial como el fenómeno del color serán estudiados, posteriormente, en su tratado sobre óptica –presentado al modo geométrico, es decir, axiomático- y cuya primera edición data de 1704. En la misiva que analizaremos, Newton informa a los miembros de la *Royal Society* –a la que recientemente se había incorporado- una serie de experimentos de los cuales se seguiría que la luz solar, la luz blanca, no es homogénea como se pensaba, sino que, por el contrario, está compuesta de haces de diferentes colores y con distintos índices de refrangibilidad. Esta comunicación ha sido discutida en numerosas ocasiones ya que uno de los experimentos que allí se

³⁰ Si bien es claro que Newton se opone a la concepción del color que propusiera Descartes, no resulta tan evidente que se aleje de una propuesta en términos mecanicistas de dicho fenómeno. De todos modos, no hay elementos – al menos no en la carta que analizaremos- que nos permitan atribuirle tal marco explicativo en el análisis de los experimentos en torno a la composición de la luz y del fenómeno del color. Aun cuando éste sea tratado en términos de la disposición de los rayos de manifestar un grado de refracción característico, no hay todavía una explicación en términos de propiedades mecánicas de la luz.

describen se considera uno de los primeros que aportan evidencia crucial para dirimir entre hipótesis rivales³¹ (es decir, la hipótesis según la cual la luz es simple, versus la hipótesis según la cual la luz es compuesta). No es esto lo que nos interesa, sin embargo. La relevancia de uno de los experimentos allí narrados reside en que éste puede considerarse un ejemplo de un experimento atributivo-cualitativo. En efecto, el denominado *experimentum crucis* que Newton describe en esta comunicación, independientemente de que posea un carácter crucial o no, nos permite atribuir una cierta propiedad a una entidad o proceso.

Los experimentos que Newton detalla en su misiva son tres. En el primero se muestra un cierto efecto a partir del cual resulta posible inferir la composición de la luz blanca. El segundo complementa al primero y constituye una *experiencia* de control, que muestra que el prisma no altera la naturaleza de la luz incidente. El tercero es aquel que Newton considera crucial, y permitiría concluir que la luz blanca es un compuesto de rayos de luz con refrangibilidad diferencial.³²

Dicho lo anterior, estamos en condiciones de advertir otra diferencia entre experimentos cuantitativos y cualitativos. Dado que en el segundo caso se trata de determinar si una entidad o un proceso bajo estudio poseen o no una propiedad, pueden requerirse experimentos complementarios con el fin de determinar si el efecto producido es un artefacto o si es un efecto estable. En los experimentos atributivos cuantitativos, aquello que es preciso determinar no es si acaso una entidad posee una propiedad, sino la magnitud con la que esta propiedad se instancia. El control, en este

³¹ Sin embargo, esto no es históricamente correcto. De hecho, ya Hooke en su obra *Microscopia* había propuesto una de sus experiencias como un caso de *experimentum crucis*; esta expresión, a su vez, es una yuxtaposición de dos conceptos baconianos: *instantiae crucis* y *experimenta lucifera* (cf. Lohne, 1968).

³² El experimento de Newton, cuando se lo quiere comprender como un experimento crucial, resulta algo desconcertante, y me parece natural que los especialistas no se pongan de acuerdo acerca de cuál es la teoría para la que este experimento aporta evidencia crucial. En efecto, si la intención de Newton era mostrar la composición de la luz blanca, resultan suficientes para lograr tal propósito el primer y el segundo experimento que describe en la carta que analizaremos a continuación. Sin embargo, Newton mismo llama crucial al tercero de estos experimentos, que, en rigor, viene a proveer evidencia respecto de una propiedad de la luz hasta entonces desconocida –o atribuida al medio de refracción: la refrangibilidad diferencial. La hipótesis que sugiero es que el concepto de *experimentum crucis* era utilizado en un sentido diferente al que le damos actualmente. El *experimentum crucis* no sería tanto una herramienta para decidir entre hipótesis rivales en disputa, sino una experiencia que aporta evidencia *inapelable* respecto de una cierta hipótesis. Si deseamos continuar sosteniendo que se trata de un experimento crucial en sentido contemporáneo, es decir, de una instancia experimental en la que se busca contrastar una predicción que se deriva de una teoría, derivándose de la teoría rival o bien su negación o bien una afirmación incompatible con la predicción a contrastar, no se comprende –Newton de hecho, no es explícito al respecto- cuál es la teoría rival. Una posibilidad es que sea crucial respecto de una teoría que afirme que el ángulo de refracción queda absolutamente determinado por el medio que atraviesa la luz, es decir, la propuesta cartesiana. En efecto, Descartes, a diferencia de Snell, parece haber llegado a la formulación de la ley de los senos por una vía teórica, contrastándola luego experimentalmente (cf. Sabra, 1981, pp. 103 y ss.).

último caso, y como hemos tenido la oportunidad de estudiar, reside en un análisis estadístico adecuado de las múltiples mediciones efectuadas para obtener un valor medio más el error asociado, algo, como advertimos en la sección anterior, de lo que adolecen los experimentos cualitativos.

A continuación presentaré y describiré, con el fin de que el lector se familiarice con el trabajo y el proceder de Newton, los tres experimentos narrados en la comunicación a la *Royal Society*. Sin embargo, es preciso destacar que todos los elementos necesarios para la defensa de la idea según la cual la luz no es homogénea sino que consiste en haces de diferente grado de refrangibilidad, pueden encontrarse en el tercero de los experimentos descritos.

Los experimentos en torno a la composición de la luz blanca presentados en la carta que discutiremos han suscitado muchísima controversia, tanto acerca de la posibilidad de reproducción de los resultados narrados (cf. Schaffer, 1989), como respecto a qué se demuestra con el *experimentum crucis*. También se ha discutido en extenso si acaso las restantes teorías en competencia podían o no acomodar los resultados de Newton (cf. Lohne, 1968; Sepper, 2002). A pesar de lo anterior, el arreglo experimental que Newton diseña no parece ser excesivamente complejo y procederemos a comentarlo a continuación.

En la primera de las experiencias descritas en su carta, Newton refiere que en una habitación en la que se ha suprimido el ingreso de luz, con el fin de que funcione como una *cámara oscura*, realiza una perforación en una persiana para controlar y dirigir la luz incidente para que ésta atraviese un prisma triangular. La luz refractaría en el prisma y se proyectaría en la pared opuesta a la ventana. Si bien el prisma era un objeto conocido en la época, su uso como instrumento científico no estaba lo suficientemente afianzado como para considerarlo un elemento capaz de revelar las propiedades de la luz. A pesar de que, según refiere Schaffer, tanto Descartes como Boyle y Hooke habían utilizado prismas en distintas investigaciones científicas, estos todavía se consideraban fundamentalmente adornos, o juguetes, o parte del *instrumentarium* de un *alquimista* o *mago natural* (cf. Schaffer, 1989, p. 73).

Así presenta Newton su descubrimiento:

Señor, para cumplir mi promesa hacia Ud. le haré conocer, sin más demora, que a comienzos del año 1666, me procuré un prisma de vidrio triangular para evaluar el celebrado fenómeno del color. Y para ello, habiendo oscurecido mi habitación y realizado un pequeño orificio en las persianas, ubiqué mi prisma en la entrada [de la luz solar] para que ésta pudiese ser refractada en la pared opuesta. Observar los vívidos e intensos colores producidos, supuso un placentero divertimento al comienzo, pero transcurrido un tiempo y considerando lo observado más circunspectamente, me sorprendió ver que *la imagen proyectada poseía una forma oblonga, que, teniendo en cuenta las leyes de la refracción, debería haber sido circular.* (1671, p. 3076, cursivas nuestras).

Nótese que Newton desvía su atención, en virtud de la discordancia respecto de lo esperado, del color de la figura a la figura coloreada, y con ello, del problema cromático al problema geométrico. El “celebrado fenómeno del color” se convertirá, en esta carta, en una investigación acerca de la composición de la luz blanca y la postulación de una nueva propiedad: la refrangibilidad diferencial. Con esto, la investigación dará lugar a una evaluación de la ley de refracción.

El fenómeno de refracción era bien conocido desde la antigüedad y fueron muchos los intentos por dar con una ley que representase dicho fenómeno. No fue sino hasta el siglo XVII, que se logró una formulación correcta de la ley. Las circunstancias que rodean a la formulación y la autoría de la ley de los senos son curiosas. Hay quienes, como Huygens (1703), consideraron que fue Willebrord van Roijen Snell, matemático holandés, quien formuló, por primera vez, y gracias a una gran cantidad de experimentos, la ley de refracción.

Otros, como por ejemplo, Jacobus Golius, atribuyen a René Descartes el logro (cf. Sabra, 1981, p. 102), pero, en este caso, Descartes habría llegado a la ley de manera puramente teórica, como puede corroborarse a partir de la lectura de su *Dióptrica*, especialmente del segundo discurso.

El manuscrito de Snell sobre la refracción se perdió, sin embargo, existen testimonios de su existencia, por ejemplo, Huygens, quien afirma haber tenido en sus manos el manuscrito y le atribuye las leyes de refracción y reflexión de la luz. Más recientemente, un historiador como Cornelis de Waard (cf. 1935), afirmó haber

encontrado en Amsterdam el índice del manuscrito de Snell. También un historiador como Vollgraff (cf. 1936) apoya el trabajo de de Waard, a partir del análisis de las notas marginales de Snell a su volumen de la *Óptica* de Risner y fecharía la formulación de la ley de refracción de Snell antes de diciembre de 1621 (cf. Vollgraff, 1936, p. 725).

Por su parte Descartes, derivó la ley de los senos *a priori*, confirmándola luego por vía experimental (cf. Sabra, 1981, p. 103). En su dióptrica propone una analogía entre el comportamiento de una pelota de tenis al atravesar una superficie delgada y las partículas de un rayo de luz al atravesar a un medio cuya densidad difiere respecto de la densidad del aire (cf. *Dioptrica*, discurso II).

De acuerdo con Ernst Mach en *The Principle of Physical Optics, an Historical and Philosophical Treatment*, Snell y Descartes formulan expresiones equivalentes de la ley, pero, en el primer caso, Snell establece una relación entre los cosecantes de los ángulos de incidencia y de refracción; mientras que Descartes postula la constancia entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción (cf. Mach, 1913, p. 35). Según los siguientes gráficos:

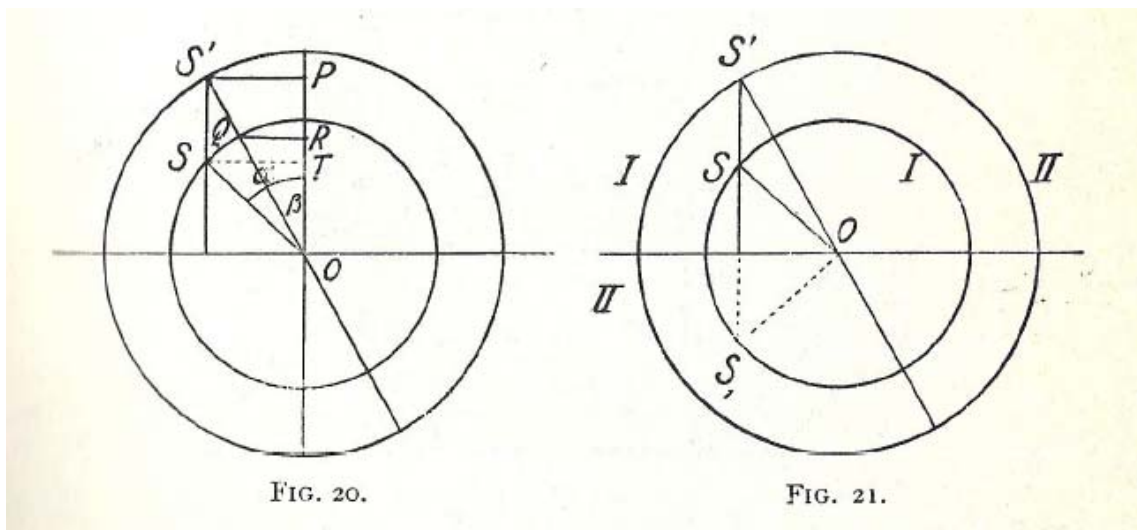


Figura 4. Representaciones gráficas de la ley de refracción. A la izquierda la representación de la relación que Snell obtuviera. A la derecha, la representación cartesiana. Tomado de Mach (1913), p. 35.

Desde luego, dado que la investigación de Newton implicará una reevaluación del fenómeno de la refracción, este descubrimiento, además, tendrá consecuencias prácticas, ya que como advierte hacia el final de su comunicación, el que la luz blanca sea compuesta y el que cada rayo de luz primitivo posea un grado de refrangibilidad característico permite explicar el fenómeno de aberración cromática propio de los telescopios por refracción.

Comenzaré presentando el diagrama del primero de los experimentos, en el que se representa el espectro oblongo que produce la luz cuando, tras haberse refractado en el prisma, se refleja en la pared.

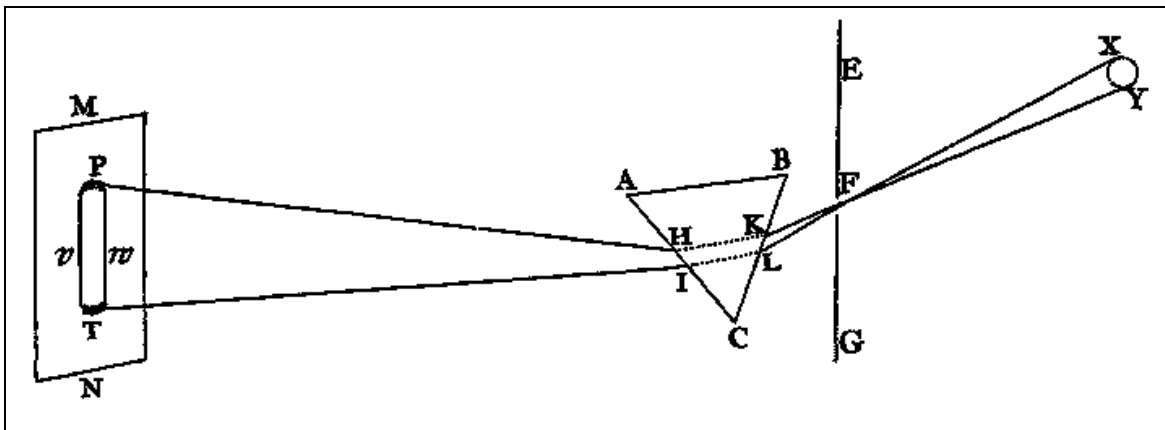


Figura 5: Diagrama del arreglo experimental. Tomado de Newton, 1704. (La ilustración debe recorrerse de derecha a izquierda).

Según Newton, el espectro, representado en el esquema por la figura *PT*, debía ser circular y, sin embargo, era unas 5 veces más largo que ancho. Pero, ¿por qué afirmaba Newton que la imagen debería haber sido circular? Esto es algo que el autor no explica en su carta a la *Royal Society*, sino en sus *Lectiones Opticae* y en su *Óptica*. La predicción según la cual el ancho y el alto de la figura debían ser de la misma longitud se deduce de la aplicación de la ley de los senos y de las condiciones iniciales del experimento, en particular, de la posición del prisma en el arreglo experimental. La imagen circular se prevé cuando se ubica al prisma de modo tal que produce la mínima desviación de los haces de luz incidentes respecto de sus posiciones originales (cf. Westfall, 1962, p. 352). La idea es básicamente la siguiente: se intenta dar con una

situación tal que la imagen producida por la refracción sea lo más similar a lo que sucedería en una cámara oscura, pero interponiendo el prisma para permitirnos observar el comportamiento de la luz bajo la situación de refracción. Esto explica la posición del prisma en la desviación mínima, es decir, aquella en la que los ángulos de cada una de las refracciones para cada rayo coinciden. También es importante notar que la anchura de la imagen sí es la esperada. Sólo el largo, dado el posicionamiento vertical del prisma, constituye una anomalía o una observación sorprendente.

En su *Óptica*, Newton sí proporciona más precisiones acerca de cuál era la posición del prisma en este experimento:

Giré lentamente el prisma sobre su eje y vi la luz refractada sobre la pared, o la imagen coloreada del sol, primero descender y luego ascender. Entre el descenso y el ascenso, cuando la imagen parecía estacionaria, detuve el prisma y lo fijé en esa posición, que ya no sería modificada. (Newton, *Óptica*, l. I, p. 1, prop. 2, teo. 2).

Y también proporciona la justificación de la posición del prisma:

Ya que en esa posición las refracciones de la luz en las dos partes del ángulo de refracción, esto es, en el ingreso de los rayos al prisma y en su salida de éste, eran iguales. (Newton, *Óptica*, l. 1, p. 1, prop. 2, teo. 2).

Dado que los haces de luz provenientes de extremos diametralmente opuestos del Sol (cf. Newton, *Óptica*, l. I, p. 1, prop. 2, teo. 2) atravesaban un medio de igual índice de refracción, deberían producir, en la pared, una imagen semejante, es decir, conformar entre las proyecciones de ambos haces de luz, una única imagen circular en *MN*. Apelemos nuevamente a la *Óptica* para encontrar la justificación teórica de esta predicción. Allí afirma:

YKHP y *XLIT* son dos rayos de luz, el primero de los cuales proviene de la parte más baja del sol hacia la parte más alta de la imagen, y que se refracta en el prisma en *K* y *H*, el segundo proviene de la parte más alta del sol hacia la parte más baja de la imagen, y se refracta en *L* y *I*. Dado que las refracciones en ambos lados del prisma son iguales [...] los dos rayos de luz siendo igualmente refractados y teniendo la misma inclinación el uno respecto del otro luego de la refracción; esto es, una inclinación de medio grado, la que responde al diámetro del sol. [...] Entonces, el largo de la imagen *PT* debería, por las leyes de la óptica vulgar, haber subtendido un ángulo de medio grado en el prisma, y haber sido igual al ancho *vw*; y, por lo tanto, la imagen debería haber sido circular. (Newton, *Óptica*, l. I, p. 1, prop. 2, teo, 2).

La ley de refracción afirma que el ángulo de refracción de un rayo luminoso depende sólo del ángulo de incidencia y de la variación de los índices de refracción de los medios atravesados. Por lo tanto, si los haces de luz están atravesando el mismo medio –el prisma- y si el medio es isotrópico, éstos deberían ser igualmente refractados. Si esto es así, entonces, deberían desviarse con el mismo ángulo de refracción y, por lo tanto, conformar una imagen circular en la pared en la que los haces de luz se proyectan. Ya que la imagen obtenida viola la ley de Snell, es preciso confirmar que no se trate de un artefacto. Es aquí donde se vuelve necesario un experimento complementario.

Newton muestra en su carta las variaciones de las condiciones iniciales y del arreglo experimental que realizó con el fin de evaluar la estabilidad de la imagen producida.³³ Al respecto, Newton se preguntará si acaso la forma de la imagen es un subproducto de alguna irregularidad en el prisma utilizado (es decir, evaluará si es verdadera la hipótesis de la anisotropía del medio). Para controlar esta posible causa de error, complejiza el arreglo experimental, añadiendo un segundo prisma ubicado de modo tal que anule los efectos del primero. Refiere el filósofo natural que la segunda refracción anula los efectos geométricos y cromáticos de la primera, produciendo una imagen circular y blanca sobre la pared, en lugar de la imagen oblonga y coloreada. Por lo tanto, ésta no es un artefacto. En resumen: en esta segunda experiencia se reconduce el haz de

³³ Para un análisis de las variaciones de las condiciones iniciales y del arreglo experimental y de las objeciones a las conclusiones de Newton, pueden consultarse especialmente Westfall, (1962); Lohne, (1968) y Sepper, (2002).

luz a su forma original. La segunda refracción produce una imagen circular y de luz blanca sobre la pared (cf. Newton, 1671, p. 3076).

Ahora bien, si la figura oblonga no es un artefacto, ¿qué es entonces?, ¿qué muestra este espectro respecto de la naturaleza de la luz? Para ello Newton apela a una tercera experiencia, nuevamente valiéndose de dos prismas. Presentaré primero un esquema del arreglo para comentarlo y analizarlo luego:

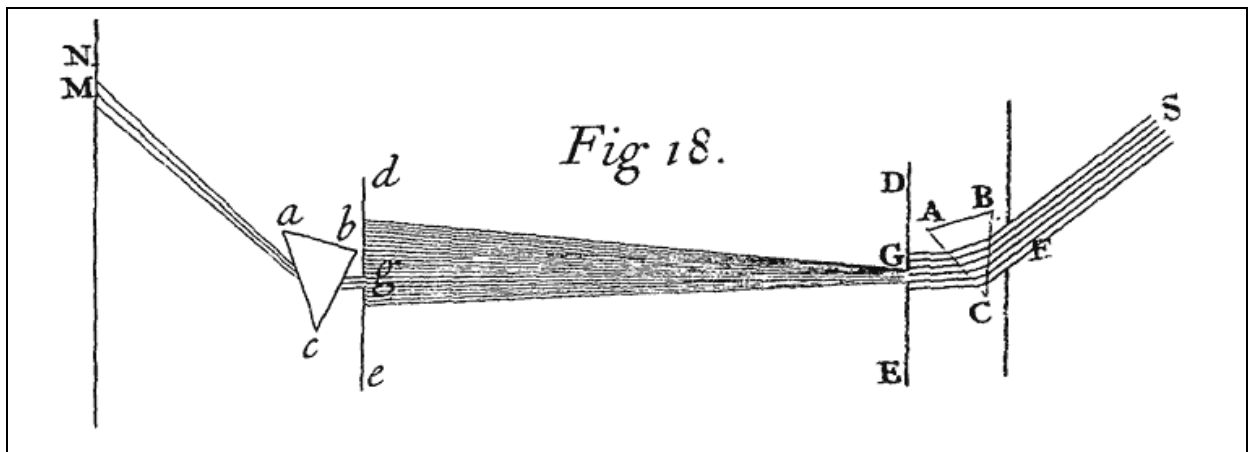


Figura 6. Representación del *experimentum crucis*. Reproducida de Newton, (1704). (El diagrama debe recorrerse de derecha a izquierda).

En este experimento se añade, a la primera refracción, una segunda. El diseño experimental permite seleccionar qué rayos de luz sufrirán la segunda refracción. Citemos la descripción del arreglo tal como la formulara Newton en la carta a la *Royal Society*:

Tomé dos paneles, y coloqué uno de ellos detrás del prisma contiguo a la ventana, de modo tal que la luz pasase a través de un pequeño orificio hecho para este propósito, y que llegase al otro panel, que coloqué a unos doce pies de distancia, habiendo realizado también un pequeño orificio en éste, para que parte de la luz incidente también pasase a través suyo. Luego ubiqué otro prisma detrás de la segunda placa, de modo tal que la luz, en su trayectoria, pudiese atravesar este prisma, y se refractarse una vez más antes de llegar a la pared. Habiendo hecho esto, tomé el primer prisma en mi mano, lo giré sobre su eje, tanto como para

permitir que las distintas partes de la imagen, proyectadas en el segundo panel, pasasen sucesivamente a través del orificio, para permitirme observar en qué partes de la pared, el segundo prisma las haría refractar. *Y vi, a partir de la variación de dichos lugares, que la luz que estaba próxima a uno de los extremos de la imagen, cerca del espacio en el que la refracción del primer prisma tuvo lugar, sufría, luego de atravesar el segundo prisma, una refracción considerablemente mayor que la luz que tendía hacia el otro extremo de la imagen.* Y consideré que la verdadera causa del largo de la imagen era sólo que la luz consiste en rayos de diferente grado de refrangibilidad, los cuales, independientemente del modo de incidencia, eran, en virtud de su grado de refrangibilidad, proyectados en las distintas partes de la pared. (Newton, 1671, pp. 3078-3079, cursivas nuestras).

En este caso, Newton añade al primer arreglo experimental una segunda refracción. Rotar el primer prisma levemente sobre su eje horizontal le permite proyectar, selectivamente, zonas del espectro formado en el primer panel, evaluando entonces el comportamiento de los haces al ser sometidos a una segunda refracción. La conclusión a la que llega Newton es que los haces que más desviación experimentan en la primera refracción son aquellos que mayor desviación experimentan en la segunda. Haces que, precisamente, son individualizables en virtud de su color. Éste se mantiene constante en la segunda refracción. Los haces que conforman a la luz blanca son rayos simples, es decir, haces de luz cuyo color no se modificará con futuras refracciones.³⁴

En sus comentarios al quinto experimento de la parte primera de su tratado de óptica, Newton afirma que si los rayos de diferentes colores se filtran (es decir, si se refractan selectivamente), entonces sí cada uno de ellos forma una imagen circular. Con ello se infiere que la ley de Snell se cumple para cada uno de los colores. El siguiente gráfico representa la yuxtaposición de las imágenes proyectadas sobre el último panel del arreglo experimental.

³⁴ En resumen: un rayo de luz blanca está compuesto por haces de luz simples de los siguientes colores: rojo, amarillo, verde, azul, violeta, naranja e índigo. Estos (y sólo éstos) son simples, es decir, sus respectivos colores no se modificarán con sucesivas refracciones.

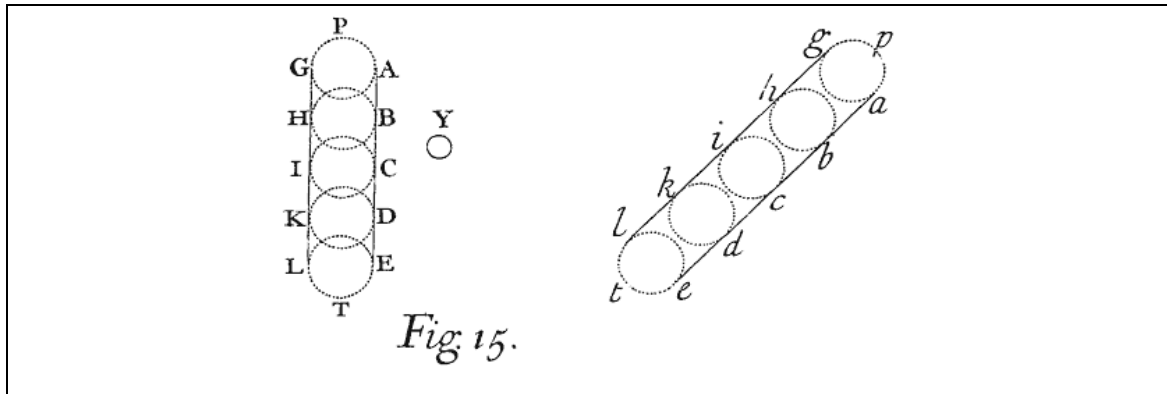


Figura 7. Ilustración de las imágenes proyectadas en la pared mediante refracción selectiva en el *experimentum crucis*.³⁵ Tomado de Newton (1704).

4.3 La interpretación de los resultados

Veamos a continuación cuáles son los distintos elementos que permitirán arribar al resultado del experimento y qué pasos interpretativos tienen lugar para producirlos. En primer lugar, encontramos la imagen proyectada sobre la pared. Se trata, como anticipamos, de una imagen alargada en sentido vertical en la que se distribuye un patrón de colores. En un primer momento, Newton prescinde de los colores como elemento relevante para centrarse sólo en la forma geométrica de la proyección. Elimina la posibilidad de que la forma del espectro sea una anomalía producto del arreglo experimental, anulando el efecto por medio del uso de otro prisma ubicado de manera inversa al primero y obtiene entonces una circunferencia de luz blanca. Descartando entonces que la imagen sea espuria, complejiza el arreglo. En un primer panel se observará el espectro original, pero, dado que este panel posee un pequeño orificio, podrá refractar de manera selectiva partes del espectro y proyectarlas sobre otra pared. Como consecuencia de esta última intervención, Newton notará que la desviación de cada rayo seleccionado concuerda con la desviación original que poseía dicho rayo en la imagen original, apoyando esto la idea de la refrangibilidad diferencial de los rayos que

³⁵ Y representa la imagen del Sol sin mediación prismática. La representación de la derecha muestra lo que sucede si aplicamos una nueva refracción selectiva, los rayos conservan su forma y su color, oponiéndose ello a las teorías de la dilatación o de la modificación.

componen la luz blanca. Cada rayo aislado obedecerá entonces la ley de Snell, pero con un ángulo de refracción característico.

Resumiendo: en este experimento³⁶ se pueden detectar los siguientes pasos interpretativos. Si nos detenemos en la figura 6 encontraremos dos elementos directamente perceptibles que constituirán el *output* del experimento: el espectro alargado y de múltiples colores que se proyecta sobre el primer panel *DE* (luego de que los rayos sufren la primera refracción) y la imagen circular monocromática *MN* que se proyecta sobre la pared.

¿Cuál es, en este experimento, el elemento saliente del *output*? Pues, básicamente se trata de la diferencia de formas de las dos proyecciones, de la diferencia cromática de ambas y de la comparación entre el color y la posición que ocupan en el segundo panel.

Nuevamente, cabe la pregunta respecto de por qué, de todas las características que posee el *output* resulta relevante para Newton la diferencia entre formas, colores y posiciones de las imágenes. Son los presupuestos teóricos asumidos en el diseño experimental los que deben ser considerados ahora para dotar de significado al *output* y la consecuente conformación del *dato* y los comentaré a continuación.

Como anticipamos, de acuerdo con la ley de Snell, dado que ambos haces de luz solar atraviesan un mismo medio,³⁷ se deben refractar con el mismo ángulo (si se satisface como condición inicial que el prisma se encuentre en la posición de desviación mínima). Si esto fuese así, el largo de la imagen debería ser igual al ancho y los haces de luz deberían producir una imagen circular. Por lo tanto, la conceptualización del *output* presupone la óptica geométrica. Para dar cuenta del diferente ángulo con el que los rayos de distintos colores se refractan en el segundo panel, Newton introduce el concepto de refrangibilidad diferencial. Esta propiedad, no será ya, como hasta entonces, una propiedad del medio de refracción, sino una propiedad disposicional de los rayos simples que conforman la luz solar. Queda claro que, a igual medio de refracción y a igual ángulo de incidencia, se produce un ángulo de refracción distinto

³⁶ A partir de ahora el análisis se centrará en el último de los experimentos narrados ya que éste contiene todos los elementos relevantes y necesarios para afirmar la hipótesis de la refracción diferencial. (Excepto, claro está, el que la misma imagen sea un artefacto. Que no es así, queda demostrado por el segundo de los experimentos considerados).

³⁷ Esto es, desde luego, una idealización que propone Newton para el tratamiento del problema. La imagen del Sol se produce con los distintos haces de luz que provienen de dicha fuente. Pero aquellos que conformarían el ancho de la imagen (dada la posición del prisma) no parecen ser problemáticos de acuerdo con las expectativas teóricas.

que depende –según Newton- del color del rayo de luz seleccionado.³⁸ La refrangibilidad diferencial sería la propiedad de los rayos homogéneos de sufrir mayor o menor desviación al refractarse. Todavía aquí no hay ninguna explicación de carácter mecánico respecto de las causas de la refrangibilidad diferencial ni de su relación con el color. Simplemente se establece una regularidad empírica entre el ángulo de refracción y el color de la luz refractada. Cabe destacar que mientras que el concepto de refrangibilidad diferencial es compatible tanto con la concepción corpuscular como la concepción ondulatoria de la luz; este concepto es sólo subsumible bajo teorías que consideran que la luz es compuesta, por ejemplo, teorías no-escolásticas sobre la naturaleza de la luz.

Notemos además, que si bien el trabajo de Newton corresponde al ámbito de la óptica física, por cuanto su indagación concierne a las propiedades y al comportamiento de la luz, el análisis de las imágenes requiere de la óptica geométrica y, por ello, de la trigonometría. Esto es así por las siguientes razones. En primer lugar, se procede a tratar a la fuente luminosa –el Sol- de acuerdo con la representación que la óptica geométrica hace de ésta.³⁹ El arreglo experimental, además, encuentra su fundamento teórico en los invaluable aportes de Johannes Kepler, y su teoría de la radiación a través de pequeños orificios (cf. Mancosu, 2008), lo que dará origen a la cámara oscura y que será, posteriormente, uno de los fundamentos de la fotografía. En segundo lugar, nos detenemos en el largo de la imagen porque consideramos que, en la medida en que es el resultado de la refracción de dos rayos luminosos, ésta debe obedecer la ley de Snell, si se cumplen al menos cuatro presupuestos:

- 1) La semejanza de los rayos ideales respecto del comportamiento de los rayos reales.
- 2) El prisma no modifica la naturaleza de la luz.
- 3) La imagen no es un artefacto producido por el arreglo experimental.
- 4) La luz es homogénea.

³⁸ En la actualidad, diríamos que el índice de refracción es una propiedad disposicional que depende del medio de refracción dada la frecuencia de la onda lumínica.

³⁹ Por ejemplo, al decir: “YKHP y XLTP son dos rayos de luz, el primero de los cuales proviene de la parte más baja del Sol hacia la parte más alta de la imagen” (cf. *Óptica*, l. I, p. 1, prop. 2, teo. 2).

Newton da por buenas tanto la hipótesis 1 como las hipótesis 2 y 3 en virtud de los resultados que arrojó el experimento control que describimos en la sección anterior.⁴⁰ Si una segunda refracción a través de un prisma en posición invertida respecto del arreglo original nos devuelve una imagen del disco solar, entonces, las idealizaciones de la óptica geométrica no son las responsables de la divergencia de la imagen respecto de lo esperado. Tampoco puede ser correcto rechazar la hipótesis 2, ya que en el marco de las teorías modificacionistas como las que sostuvieron Descartes y Hooke, una segunda refracción dispersaría aún más los rayos, modificando entonces aún más la imagen original. Tampoco es posible rechazar la tercera hipótesis ya que el prisma invertido devuelve una imagen del disco solar. Con ello, Newton se inclinará por negar la cuarta hipótesis y buscará explicar a partir de un único principio –la refrangibilidad diferencial- tanto la variación de la forma de la imagen como el fenómeno del color; tanto el problema geométrico como el problema cromático, y mostrará que la ley de Snell sí se cumple –aunque de manera diferencial- para cada rayo simple de luz.

Analicemos ahora, más detalladamente, algunos de los presupuestos teóricos que guían el experimento.

En la realización material:

(1) *Newton presupone que el prisma es un instrumento adecuado para mostrar cuál es la naturaleza de la luz:* El primer presupuesto teórico que puede distinguirse en las experiencias que Newton lleva a cabo es la idea según la cual el uso de un prisma no modifica en un sentido ontológico a la luz, sino que, por el contrario, éste es un instrumento adecuado para mostrar su composición. Ello supone una negación de las teorías escolásticas de la luz, según las cuales los colores producidos por los prismas eran aparentes, en contraposición con los colores de los cuerpos que sí eran reales. Asimismo, si bien la influencia de Descartes se hace sentir en los trabajos ópticos de Newton, también el experimento del físico inglés supondría una negación de la teoría de los colores cartesiana, según la cual todo color es aparente, ya que para Newton los colores resultantes de la refracción prismática serán reales y constitutivos de la luz blanca. (Schaffer, 1989, p. 74). Esta presuposición, sin embargo, no carece de

⁴⁰ Para un análisis de las variaciones de las condiciones iniciales, del arreglo experimental y de las objeciones a las conclusiones de Newton pueden también consultarse Westfall (1962); Lohne (1968) y Sepper (2002).

fundamento. En efecto, el experimento control que narramos justifica el uso del prisma para mostrar la naturaleza de la luz.

En la interpretación de los resultados:

(1) *Newton presupone la concepción corpuscular de la luz:* En los experimentos narrados se asume el comportamiento corpuscular de la luz y se privilegia la *teoría emisionista* por sobre una *teoría del continuo*, es decir, la interpretación descansará en la concepción de la naturaleza corpuscular de la luz por sobre una explicación en términos ondulatorios de lo observado. En la carta a la *Royal Society*, Newton afirma:

[Los haces de luz] terminaban a los lados en líneas rectas, pero en los bordes, la luz decaía tan gradualmente que era difícil determinar con precisión cuál era su figura; sin embargo, parecía semicircular. (Newton, 1671, p. 3076).

Newton parece estar advirtiendo que la imagen producida en la pared posee límites borrosos, algo esperable y explicable a partir de la teoría ondulatoria de la luz, que estaba en pleno proceso de desarrollo en la época. En efecto, Christian Huygens presentará su *Traité de la lumière* en 1678 (aunque su primera edición data de 1690), cuestionando allí la propagación rectilínea de la luz y la primera edición de la *Óptica* de Newton no fue publicada hasta 1704, con lo que, seguramente, Newton estaba al tanto de la posibilidad de explicar los bordes difusos de la imagen proyectada en términos ondulatorios. Sin embargo esto no tiene consecuencias que puedan viciar el resultado del experimento. El concepto de refrangibilidad diferencial es compatible con ambas concepciones.

(2) *Newton presupone que el comportamiento físico de la luz responde a la óptica geométrica:* Es interesante notar un rasgo de la estrategia newtoniana en este experimento, en el que los rayos de luz, que siempre fueron concebidos como una idealización propia de la óptica geométrica, pasan a ser considerados como físicos, en un proceso de reificación en el que la distinción entre la representación y lo representado se diluye. Así lo entiende Sepper:

Resulta claro –a partir de las palabras y de la práctica de Newton- que el rayo de luz, concebido de manera abstracta y matemática, pasa a ser tomado como una entidad física y que éste es el objeto genuino de investigación. Los fenómenos ofrecen evidencia acerca de los rayos de luz y de sus posiciones. [...] La reificación es sutil, pero eficaz. Estos rayos no son meras líneas que percibe el ojo de la mente, están presentes y activos, sufren refracción, atraviesan aperturas, viajan desde el sol. [...] Le toma cuatro párrafos pasar de la concepción de un rayo como una línea al rayo como un conjunto de corpúsculos viajeros. La representación geométrica se libera de la subordinación a la imagen y se constituye en la guía para todos los razonamientos sobre la luz, y tanto la imagen como el color se subordinan a la descripción matemática. (Sepper, 2002, pp. 127-128).

Este presupuesto queda también de manifiesto a partir del modo de posicionar el prisma en el primer arreglo experimental. De acuerdo con las leyes de la óptica geométrica, el único caso en el que se esperaría una imagen circular es aquel en el que el prisma se ubica en una posición de mínima desviación (cf. Lohne, 1968 y Sepper, 1994).

El experimento que acabamos de analizar fue considerado un ejemplo de experimento *libre de teoría* de acuerdo con Hacking, quien afirma:

Encontramos una serie completa de observaciones “sorprendentes”. [...] Estas observaciones precedieron a la teoría en una forma característica. También la observación de Newton de la dispersión de la luz, y el trabajo tanto de Hooke como de Newton acerca de los colores en láminas delgadas. [...] Desde luego Bartholin, Grimaldi, Hooke y Newton no eran empiristas descerebrados (*mindless*) sin ideas en sus cabezas. Vieron lo que vieron porque eran curiosos, inquisitivos, reflexivos. Intentaban desarrollar teorías. Pero en todos estos casos es claro que las observaciones precedieron toda formulación de una teoría. (Hacking, 1983, p. 156)

Si lo que quiere significar Hacking con esta afirmación es que el experimento de Newton se realizó en el marco de una suerte de vacío teórico, la afirmación es falsa. Como he mostrado, en primer lugar, la investigación se inscribe en una discusión

abierta sobre el fenómeno del color y sobre la naturaleza de la luz. Newton tiene como interlocutores a quienes defienden teorías modificacionistas. En segundo lugar –y mencionando sólo dos de los presupuestos teóricos requeridos para desarrollar los experimentos y para interpretarlos- la estrategia experimental de Newton es exitosa sólo en el caso en que el prisma se encuentra en la posición de desviación mínima, en la que se espera que la imagen proyectada se corresponda, *mutatis mutandis*, con la forma del Sol. En cualquier otra posición es esperable que la imagen altere sustantivamente la forma del disco solar. Esto dista de ser una observación sorprendente, es una observación que resulta de una reflexión cuidadosa enmarcada en el conjunto de teorías que describimos en la sección anterior.

Si, por otra parte, lo que quiere significar es que la investigación realizada contribuye con el desarrollo de una teoría en la medida en que, por ejemplo, las investigaciones de Newton permiten acuñar un nuevo concepto, pues, ciertamente, esto es correcto, pero ello parece una trivialidad. Creo que Hacking nos enfrenta con un problema que tiene que ver, finalmente, con la ambigüedad con la que utiliza el término “teoría”. ¿A qué teoría preceden los experimentos sobre la composición de la luz? ¿Qué teorías le permiten comprender lo que está observando? ¿De qué teorías dependen los resultados obtenidos? ¿Qué teorías se forman? Creemos que un análisis más fino es posible y que nos permitirá entender el alcance de la autonomía de la experimentación con mayor claridad. A ello nos dedicaremos en el capítulo ocho.

Por su parte, si bien Heidelberger (1998) destaca el equívoco que se produce en la discusión entre presupuestos teóricos en los experimentos *vis a vis* la idea de que todo experimento es la contrastación de una teoría y rechaza esta última afirmación; el autor entiende que la experimentación libre de presupuestos teóricos es posible y que los resultados experimentales no requieren necesariamente de una interpretación teórica para ser significativos. Para defender esta idea, distingue tres tipos de instrumentos, representativos, constructivos y productivos y explica que los instrumentos productivos amplían simplemente la experiencia creando nuevos fenómenos y que son libres de teorías en la medida en que no requieren de una interpretación teórica para dotar de sentido los resultados obtenidos. Afirma:

Los tres experimentos aquí discutidos, el productivo, el representativo y el constructivo, poseen una cierta autonomía frente a la teoría. Experimentar es posible, ante todo, "sobre un trasfondo formado por la expectativa", [...] pero no se requiere ninguna interpretación teórica en la experimentación puramente productiva y constructiva. Con ello se muestra, lo que era el objetivo de este trabajo, que la experimentación posee también una función creadora genuina, que (en el sentido definido) es independiente de la teoría. La experimentación sirve no sólo para la contrastación de teorías sino también para la creación de realidad [efectiva]. (1998, p 88).

Según Heidelberger, el prisma es un instrumento productivo, y, por lo tanto, su uso, en el marco de un experimento, da como resultado un experimento que es libre de teoría en el sentido de ser teóricamente neutro, es decir, es libre de teoría en la medida en que los fenómenos no se inscriben *en una estructura abstracta y simbólica* (cf. Heidelberger, 2003, p. 141). Sin embargo, en este capítulo, y tomando precisamente un experimento en el que el prisma es el *instrumento solista*, hemos identificado una serie de momentos en los que los fenómenos, los *outputs*, sí se inscriben en una estructura abstracta y simbólica, y, por lo tanto, la tesis que defiende Heidelberger es falsa.

Por último, así como lo hicimos en el capítulo anterior, es momento de que nos preguntemos: ¿Qué podemos inferir respecto de la conformación de los resultados experimentales en el caso de los experimentos atributivos cualitativos si tomamos como ejemplo la determinación newtoniana de la refrangibilidad diferencial? También en este caso encontramos un *output*, esto es, un evento directamente perceptible que será el objeto de la *interpretación interna*. El *output*, en este experimento, es más complejo que aquel del ejemplo que tratamos en el capítulo anterior. En el último de los experimentos de Newton que estudiamos, el *output* se compone de dos imágenes: el espectro oblongo y coloreado que se forma en el primer panel (*DE*), las imágenes circulares y monocromáticas que se forman en el tercer panel y la posición de estas imágenes en el panel (véase fig. 6). ¿Qué elementos del *output* son el objeto de la *interpretación interna*? En este caso el *dato* se constituye tomando en cuenta la diferencia de *formas* de las imágenes y la variación de la *posición* de los haces de luz en los paneles. ¿Por qué es esto relevante para el experimento? Básicamente porque la ley de refracción de Snell, la teoría de la radiación a través de aberturas pequeñas y la idea según la cual los rayos

de luz se comportan tal como lo indica la óptica geométrica volverían esperable un *output* con ciertas características, es decir, una imagen circular y monocromática posicionada en el último panel y ubicada en el plano perpendicular al orificio que la luz atraviesa. En una instancia posterior se considera que se ha determinado el ángulo de desviación específico de cada haz de luz según su color, y que los rayos de luz de color poseen una refrangibilidad diferencial que les es característica. Esto es compatible, como dijimos, sólo con teorías no-modificacionistas de la luz.

Los experimentos existenciales: Weber y la detección de ondas de gravedad.

5.1 Los experimentos existenciales

Como anticipamos, los experimentos existenciales tienen como meta determinar si un tipo de entidad o proceso existe o no. Habitualmente se realizan con el fin de hallar la referencia de un concepto previamente introducido en el marco de una teoría científica. Como ejemplos, consideremos los intentos de Weber para detectar ondas de gravedad, cuya generación -bajo ciertas condiciones- había sido predicha por la teoría general de la relatividad. También la detección de neutrinos que realizaron Reines y Cowan es un caso de experimento existencial. Los casos más claros y más típicos de este tipo de experimento son los casos en los que se intentan detectar las partículas predichas por el modelo estándar, como los bosones vectoriales W y Z, y, tomando un caso más reciente y que ha recibido muchísima prensa: el bosón de Higgs. Finalmente, la investigación experimental acerca de la desintegración beta puede pensarse como un experimento existencial de un proceso físico, también los experimentos para detectar corrientes neutras.⁴¹ Los experimentos existenciales proporcionan resultados que pueden ser formulados como respuestas de tipo sí/no a la pregunta por la existencia de x o como una afirmación de carácter existencial, de allí el nombre elegido. Como señalamos en capítulos anteriores, un experimento existencial puede presuponer la determinación del valor de una propiedad cuantitativa, sin embargo, los experimentos existenciales afirman algo más que la mera determinación del cuánto de una propiedad. En muchos casos, éstos suponen una inferencia que establece un nexo entre la medición de un

⁴¹Podríamos pensar que el esquema interpretativo de los experimentos existenciales que detectan entidades difiere respecto del esquema de aquellos experimentos que detectan procesos. En esta investigación, nos centraremos en los primeros, que son más básicos. Dado que el objetivo de este trabajo es mostrar que los experimentos exploratorios no son autónomos respecto de las teorías científicas en los sentidos que precisaremos en el capítulo VIII, si podemos mostrar que el caso más simple de experimento existencial presupone un conjunto de teorías en la conformación del resultado experimental, se seguirá que los experimentos existenciales de procesos también lo presupone.

parámetro o propiedad a la existencia de una entidad o proceso que existirá si y sólo si dicha propiedad se detecta.

5.2 Las ondas de gravedad

La teoría general de la relatividad es uno de los logros más importantes en la historia de las ciencias. Su capacidad predictiva es notable. No solo fue capaz de explicar todos los hechos que la teoría newtoniana de la gravitación predecía, sino que permitió explicar fenómenos ya conocidos que resultaban anomalías en el ámbito de la mecánica newtoniana, como el avance del perihelio de Mercurio; así como comprender la razón por la cual la masa inercial y la masa gravitatoria coinciden. Además, la teoría general de la relatividad no requirió apelar a fuerzas a distancia ya que proporcionó una forma alternativa de concebir la gravedad como una propiedad geométrica del espacio-tiempo, es decir, como resultado de la curvatura del espacio-tiempo en la que las masas se mueven siguiendo un trayecto inercial.⁴² Si lo anterior no fuese suficiente, realizó predicciones novedosas que requirieron un tiempo hasta ser puestas a prueba. Entre ellas se encuentran, por ejemplo, la desviación de la luz cerca de cuerpos masivos que alteran la curvatura del espacio-tiempo, el fenómeno del *lensing* gravitatorio, etc.⁴³ Pero entre todas las predicciones de la relatividad general, hay una que, desde 1960, recibió cada vez más atención por parte de la comunidad científica: la existencia de ondas de gravedad.

Einstein (cf. Amaldi, 1980) ofreció dos soluciones de las ecuaciones de la teoría en las que se generaban ondas de gravedad. Pero, ¿representaban estas soluciones situaciones empíricamente posibles? O ¿eran tan sólo una consecuencia del aparato matemático utilizado?

La existencia de ondas de gravedad no ha sido confirmada por métodos directos, al menos no todavía y a pesar de los numerosos y sofisticados detectores que se han puesto en funcionamiento en varias partes del mundo. A pesar de esto, puede decirse que sí

⁴² Sin embargo esto, así expuesto, puede inducir a confusiones. En las próximas páginas se precisará esta idea y, para ello, deberemos tomar en consideración la no-linealidad de la teoría general de la relatividad.

⁴³ Para las corroboraciones experimentales de la teoría general de la relatividad puede consultarse Will (2001).

existe evidencia indirecta de la existencia de estas sutiles ondas. Esta evidencia se obtuvo a partir de la observación del púlsar binario PSR 1913+16 que descubrieron Russell Hulse y Joseph Taylor y por lo que recibieron el premio Nobel de física en el año 1993. La idea detrás de esta medición indirecta consistía en calcular la pérdida de momento angular orbital y afirmar que la mejor explicación para los datos obtenidos era considerar que el sistema estaba emitiendo ondas de gravedad (cf. McCulloch et al., 1980).

Los métodos directos de detección, por su parte, ocupan a investigadores al menos desde 1960. Es importante destacar que la existencia o no de las ondas de gravedad no sólo es relevante desde un punto de vista estrictamente científico o en virtud de las repercusiones prácticas de un descubrimiento como ese –pensemos en la información que podríamos obtener acerca de agujeros negros y de otros procesos que ocurren en el universo a los que no podemos acceder con las restantes formas de radiación. La radiación gravitatoria podría ser, como afirmó Kip Thorne (cf. 1988), *otra ventana al universo*. Podría permitirnos obtener información acerca del universo a la que no podemos acceder por medio de ondas electromagnéticas o acústicas. La detección de ondas de gravedad también sería relevante desde un punto de vista estrictamente filosófico. Su existencia puede pensarse como una buena razón para apoyar una concepción substantivalista del espacio-tiempo en detrimento de una concepción puramente relacionista. Paradójicamente, si bien Einstein estaba comprometido con el proyecto machiano (cf. Maudlin, 1993), poseemos evidencia de que postuló la existencia de un *éter relativista*, diferente al éter electromagnético que consideró superfluo en el marco de la relatividad especial (cf. Cassini y Levinas, 2009).

Es preciso preguntarnos ahora ¿Qué clase de teoría es la relatividad general? ¿Cuáles son las particularidades de su estructura matemática? En primer lugar, la teoría de la relatividad es una teoría no-lineal. En este contexto, la no-linealidad significa que las variables no son independientes. Más específicamente, lo que la no-linealidad de las ecuaciones de la teoría recupera es que no se puede expresar la curvatura del espacio-tiempo como la suma de dos componentes independientes (cf. Blair, 1991, p. 6). En esta teoría, el tensor momento-energía -que describe la distribución de la masa, la energía y la densidad de momento en el sistema que se estudia- se relaciona con el tensor curvatura o, como se lo denomina habitualmente, con el *tensor de Einstein*, que es aquel que describe la curvatura del espacio-tiempo y que depende, a su vez, de la métrica g .

John Wheeler (1962) encontró una bella forma de explicar esta interdependencia entre variables: “La materia le indica al espacio cómo curvarse, el espacio le indica a la materia como moverse”. Sin embargo, ésta es sólo parte de la historia, David Blair aclara: “Esto esconde parte de la complejidad, ya que en rigor: la materia, el movimiento de la materia, la densidad de radiación incluyendo las ondas de curvatura le dicen al espacio-tiempo cómo curvarse. La curvatura crea curvatura e influye en su propagación” (Blair, 1991, p.6).

Consideremos ahora la ecuación de campo para la relatividad general, la cual en una forma geométrica abstracta y libre de coordenadas puede escribirse de la siguiente forma:

$$(1) \mathbf{G} = 8 \pi \mathbf{T}$$

Donde \mathbf{G} es el *tensor de Einstein* (también llamado *tensor curvatura*), que proporciona una descripción de la estructura geométrica del espacio tiempo, y \mathbf{T} es el *tensor momento-energía*, que describe la distribución de la materia y la energía en el espacio-tiempo.⁴⁴

El *tensor momento-energía* depende de varias constantes, tales como la velocidad de la luz, la constante gravitacional y de una constante de proporcionalidad. Pero también depende del *tensor curvatura* \mathbf{G} . Al mismo tiempo, la curvatura del espacio-tiempo depende de cómo la materia se distribuye, es decir que depende del *tensor momento-energía* \mathbf{T} . De modo que no es posible expresar el contenido de \mathbf{T} sin invocar al tensor \mathbf{G} y viceversa. Todo cambio en \mathbf{T} o en \mathbf{G} implicará un cambio en el otro tensor. Lo mismo ocurre con las ondas de gravedad. Por una parte, éstas se introducen en un término que aparece en la especificación del *tensor curvatura*, y, por otra, la ecuación de campo (1) nos permitiría determinar si bajo ciertas condiciones particulares el sistema producirá ondas de gravedad. Más aún, dado que las ondas de gravedad pueden interactuar entre sí (como cualquier fenómeno ondulatorio), puede esperarse que surjan procesos de amplificación de las ondas o que estas se cancelen. También puede suceder que interactúen con la curvatura del espacio-tiempo y sean desviadas. Todo esto, como indica David Blair, hace muy difícil contrastar los modelos de las fuentes de ondas de

⁴⁴ Esta es una formulación restringida, sin la constante cosmológica, que no es relevante en nuestra discusión de las ondas de gravedad. Para una formulación completa de las ecuaciones de campo de Einstein, así como de sus diversas formas equivalentes, véase, por ejemplo, Schutz (2009).

gravedad y calcular con precisión, dada una fuente en particular, cuál es la señal a detectar en el caso de que las ondas de gravedad efectivamente existan. En sus palabras:

La complejidad no-lineal genera dificultades matemáticas enormes. No podemos separar rigurosamente el espacio-tiempo y presentarlo como la suma de una curvatura estática más una curvatura variable en virtud de las ondas de gravedad. Por lo tanto, a pesar de que Einstein obtuvo soluciones para ondas de gravedad muy rápidamente (Einstein 1916, 1918) pasaron al menos 40 años en los cuales se cuestionó la existencia de las ondas de gravedad. Eddington dijo, por ejemplo, que las ondas de gravedad viajaban a la velocidad del pensamiento. (1991, p. 6).

De hecho Einstein, en los trabajos citados, introduce una idealización que puede ayudarnos a superar estas dificultades. La estrategia consiste en asumir la geometría de Minkowski para el espacio-tiempo. Con ello, se considera que el espacio es plano, que las ondas de gravedad también lo son y se expresa la ecuación de campo linealmente, es decir, como la suma de dos términos. La justificación para asumir tales supuestos estriba en que, por las distancias entre las fuentes de ondas de gravedad, independientemente de la amplitud inicial de las mismas, se las puede considerar planas. Nuevamente, tomando a Blair:

En el caso de los análisis para la detección de ondas de gravedad la situación es diferente. Aun cuando se trate de las ondas de gravedad más intensas emitidas por una fuente astronómica sólo necesitamos considerar ondas planas y lineales en un espacio plano. Esto es en virtud de que la amplitud de las ondas atravesando el sistema solar, aun si proviniesen de una fuente intensa y cercana, debe ser extremadamente pequeña, a pesar del flujo de energía, que puede ser enorme. (...). En consecuencia, a pesar de la no-linealidad, hacemos una separación, que no es completamente adecuada. Asumimos la superposición, que es esencial al concepto de ondas de gravedad, que no es estrictamente rigurosa, que puede preocupar a algunos físicos teóricos, pero que no tiene por qué preocupar a los experimentalistas. (1991, p. 8).

En otros términos, la curvatura del espacio-tiempo se entenderá como la suma de un término constante de fondo (*background term*), que expresará los factores relevantes que contribuyen a determinar dicha curvatura, exceptuando las ondas de gravedad, y un término ondulatorio. Se asumirá, además, que la variación de la curvatura es lenta y que la variación de la onda es sumamente rápida, de modo que resulte posible desestimar la distorsión que la onda produciría en la curvatura de fondo y, a su vez, cómo esta variación podría afectar el tensor \mathbf{G} y, consecuentemente, el tensor \mathbf{T} .

Hasta aquí nos hemos preocupado por la representación de las ondas de gravedad en el marco de la ecuación de campo. Abordemos ahora otro aspecto relevante. ¿Cómo se generan las ondas de gravedad? ¿Qué propiedades poseen? Responder ambas preguntas es clave ya que esto determinará cómo se llevarán a cabo los experimentos para determinar si las ondas de gravedad existen. Con respecto a su producción, como afirmé antes, según la teoría general de la relatividad, los cuerpos masivos alteran la curvatura del espacio-tiempo. Cuando un cuerpo masivo e irregular se acelera⁴⁵ (cf. Blair, 1990, p. 16) o cuando modifica su estado (como por ejemplo cuando una estrella de neutrones colapsa y su masa se transforma en energía) la curvatura del espacio-tiempo cambia y este cambio puede manifestarse en forma de radiación gravitatoria propagándose a la velocidad de la luz. Considerando ahora sus propiedades, se piensa que las ondas de gravedad son ondas transversales. En este tipo de ondas, la oscilación es perpendicular a la dirección del movimiento. Dado que el tratamiento idealizado nos lleva a considerarlas planas, se polarizan en las dimensiones x y z . Por la misma razón, serán tratadas como si careciesen de altura, y, por lo tanto, el valor para el eje y será cero (cf. Blair, 1991, p. 8).

⁴⁵ Blair afirma que “el colapso simétrico de una estrella no generará ondas de gravedad” La relevancia de la asimetría en el marco de la generación de ondas de gravedad se relaciona con el hecho de que debe existir una variación de la densidad de masa para que la curvatura del espacio-tiempo sufra una distorsión y, consecuentemente, para que se produzcan ondas de gravedad. En resumen: sin asimetría no hay producción de ondas de gravedad.

5.3 El experimento de Weber

En la década de 1960, Joseph Weber, investigador de la Universidad de Maryland, comenzó una serie de experimentos para detectar ondas de gravedad. Rápidamente sus experimentos generaron polémica, así como los resultados que obtuvo. De hecho, todavía hoy no hay consenso respecto de la existencia o no de las ondas de gravedad ya que las mismas no pudieron ser siquiera detectadas con la segunda generación de instrumentos de gran sensibilidad. Sin embargo, como señalé, sí existiría evidencia indirecta.

Se acepta que si en efecto existe la radiación gravitacional, ésta podría generarse a partir de distintas fuentes. Si tenemos en cuenta las propiedades de las fuentes, podríamos a la vez saber qué tipo de radiación debemos esperar y en qué frecuencia podríamos detectarla. Las fuentes pueden ser tanto discretas como continuas,⁴⁶ las explosiones de novas y supernovas, la creación de agujeros negros e inclusive las colisiones entre éstos son formas de radiación discreta. Los púlsares binarios, las estrellas de neutrones y la creación del espacio-tiempo, son, por el contrario, fuentes continuas de radiación. Establecer qué tipo de fuente se investigará es de vital importancia al momento de construir un detector de ondas de gravedad adecuado. La antena debe sintonizarse a la frecuencia de emisión esperada y ello determinará, a su vez, cómo analizar y modelar los datos obtenidos (cf. Davies, 1980, p. 77 y ss.).

Joseph Weber, quien no sólo era físico, sino también ingeniero, diseñó una de las primeras antenas para detectar ondas de gravedad. De hecho, hasta hoy, este tipo de detectores se conocen con el nombre de “antenas de Weber”.⁴⁷

La antena no es un aparato excesivamente sofisticado. Consiste en un cilindro de aluminio de 1.53 metros de largo, 0.66 metros de diámetro y 1.4 toneladas de peso. Tampoco los principios que rigen su funcionamiento son tan complicados. La idea central es que la barra se comportará como un oscilador armónico que responderá a frecuencias cercanas a los 1660 hertz. La sintonización le permitiría a Weber detectar la emisión de radiación gravitatoria proveniente de colapsos de supernovas (cf. Weber, 1969). La antena está conectada a transductores que convierten las oscilaciones de la

⁴⁶ La radiación es discreta si es una consecuencia de eventos puntuales y si su existencia está temporalmente acotada.

⁴⁷ Para los trabajos de Joseph Weber sobre la detección de ondas de gravedad consúltese: Weber (1960, 1967, 1968a, 1968b, 1969, 1970, 1972).

barra en impulsos eléctricos, estos, a su vez, deben ser amplificados y grabados. Según Blair et. al. (1991):

Una onda de gravedad distorsiona el anillo de partículas de prueba (*ring of test particles*). [...]. En un artículo de 1960, publicado en la revista *Physical Review*, Weber mostró que la masa cuadripolar de un oscilador armónico podía ser excitada por ondas de gravedad. El oscilador cuadripolar más sencillo queda representado por un par de partículas unidas por un resorte. La onda gravitatoria efectuará trabajo en el oscilador. En la práctica, el oscilador compuesto por dos masas unidas por un resorte se puede reemplazar por un sistema como una barra o un bloque o una esfera de algún material. Weber sugirió que el material podía ser piezoeléctrico. En ese caso la onda podría ser observada como un voltaje piezoeléctrico a través del oscilador. El oscilador armónico también podría ser una barra de metal y, en ese caso, un transductor captaría el movimiento de la barra. Finalmente, el detector podría ser inclusive la tierra y diferentes sismómetros captarían las señales a muy bajas frecuencias. (1991, p. 43).

De modo que, en primer lugar, las ondas de gravedad se intentarán detectar por medio de un instrumento de tipo newtoniano: un oscilador armónico.⁴⁸ Cuando una onda de gravedad impacta en el detector, la antena absorbe su energía y la convierte en ondas sonoras (cf. Davies, 1980, p. 124). En segundo lugar, el *outcome* del experimento será un voltaje, ya que la oscilación de la barra será transducida a partir de los componentes piezoeléctricos asociados al aparato. Citaré *in extenso* a David Blair ya que una analogía que propone puede resultarnos útil para imaginarnos cómo sería una onda de gravedad y cómo puede detectarse.

Una onda de gravedad que atraviesa la barra genera un estiramiento en ésta. Dado que la antena posee una rigidez finita, la onda realiza trabajo, depositando energía en la barra. En principio esto puede detectarse. Sin embargo, la detección es un proceso muy sutil y para comprenderlo quiero proponer una analogía. Una onda de gravedad es análoga a una ola de agua, una ondulación en la curvatura del espacio-tiempo. Pero el espacio es muy rígido y la materia es extraordinariamente maleable

⁴⁸ Aun si para interpretar lo que se ha detectado, se pensará en términos de variación del momento cuadripolar de la antena, los principios físicos que rigen la antena son básicamente newtonianos.

en comparación. Si una onda de gravedad es similar a una ola de agua, entonces la materia es como un trozo de papel flotando en el agua. Se moverá con la onda y absorberá una pequeña cantidad de su energía. Si tratase de medir el movimiento del papel en relación con otro papel que flota en las cercanías, también éste se movería con la ola. Habría prácticamente un desplazamiento nulo. Lo mismo sucede con los extremos de la barra de metal y cualquier dispositivo adjunto. Se moverían sin manifestar ningún tipo de movimiento relativo, de modo que el paso de la onda no sería detectado. Es decir, una medición local no puede detectar una onda de gravedad. Sin embargo, si la barra resuena, es decir, si suena como una campana, entonces, luego del paso de la onda, la barra seguirá sonando. Esta memoria asociada con la resonancia hace que la detección sea posible. Una medición local en un extremo de la barra puede detectar los efectos de la onda sobre la misma. (Blair, 1991, p. 46).

A pesar de que se considera que las ondas de gravedad transportan muchísima energía, el efecto que causarían en una antena es sumamente débil, por lo tanto, la antena debe ser muy sensible. A su vez, a consecuencia de la sensibilidad, la antena detectará una cantidad de cambios que incrementan considerablemente los riesgos de obtener un *falso positivo*, es decir de cometer un error de tipo I.⁴⁹ En el experimento de Weber, el problema del ruido fue cuidadosamente tratado. En primer lugar se estableció un umbral y se emplearon numerosas estrategias para la disminución del ruido, entre ellas, se introdujeron varios detectores independientes de la barra para detectar vibraciones sísmicas, acústicas y electromagnéticas. La antena se colocó en una cámara de vacío a una temperatura cercana al cero absoluto para disminuir el ruido termal tanto como resultó posible. Sin embargo, esta última forma de ruido no pudo ser anulada completamente ya que la antena no puede alcanzar una temperatura tan baja. Además, los voltajes obtenidos fueron modelados apelando a una transformación de Fourier, para distinguir con mayor precisión la señal del ruido.

Sólo después de tomar estas precauciones y tras comparar las salidas de dos resonadores ubicados en laboratorios alejados y tomando en consideración sólo los outputs coincidentes entre ambos detectores, Weber anunció, en una comunicación que se publicó en el *Physical Review Letters* (1969), sus resultados. Sus registros indicaban

⁴⁹ La clasificación de errores a la que aludimos es propia de la estadística clásica. El error de tipo I –un falso positivo- ocurriría si fijamos un umbral de detección bajo, si no existen ondas gravitatorias. El error de tipo II –un falso negativo- se produciría al establecer un umbral elevado si efectivamente existiesen ondas gravitatorias y si el detector funcionase correctamente.

un exceso de siete pulsos por sobre el umbral establecido que no podían atribuirse a ningún otro factor.

5.4 Críticas al experimento de Weber

Antes de pasar al análisis de la conformación de los resultados en el caso del experimento de Weber, me interesaría detenerme en ciertas peculiaridades del caso. Como sabemos, todavía hoy no nos resulta posible medir de modo directo ondas de gravedad y los resultados de Weber despertaron el interés de la comunidad científica. Los resultados eran altamente improbables en el marco del conocimiento cosmológico y astrofísico aceptado, si bien no incompatibles con éste. Por ello, la comunidad científica recibió la comunicación de Weber con gran escepticismo (cf. Levine, 2004).⁵⁰ Rápidamente, distintos equipos de investigación intentaron reproducir sus hallazgos, sin embargo, obtuvieron resultados nulos que contribuyeron a poner en cuestión el experimento de Weber, especialmente, en lo concerniente a la interpretación de los *outputs* obtenidos. Haré una larga digresión para detallar los distintos errores que Weber cometiera y finalizaré esta sección distinguiendo los elementos constitutivos del resultado proporcionado y las teorías utilizadas para efectuar la interpretación del *output*.

Como mencioné, los resultados de Weber llamaron la atención de la comunidad científica, especialmente por dos razones, en primer lugar, en virtud de la captación simultánea de señales en detectores alejados, lo que sugería que estas señales no eran artefactos. En segundo lugar, el supuesto efecto anisotrópico de las señales detectadas, es decir que la señal era más intensa cuando más se acercaba el detector al centro de la galaxia. Ambas fueron razones poderosas para sumar a otros investigadores al área, dado que manifestaban regularidades en los datos que volvían improbable que los mismos fueran meramente ruido o fluctuaciones aleatorias producto del tratamiento estadístico. A continuación conoceremos la suerte que corrieron las dos armas principales de Weber al momento de sostener sus *descubrimientos* en el seno de la comunidad científica.

⁵⁰ Desafortunadamente, Weber cometió una serie de errores al establecer las correlaciones temporales entre detectores, en la afirmación según la cual también se detectaba una correlación sideral, y, finalmente, en el análisis para el procesamiento de datos elegido.

Lamentablemente, la coincidencia temporal en el registro de picos entre dos detectores situados a gran distancia se debió a un error del cálculo en la conversión horaria. El primer detector se ubicaba en la Universidad de Maryland y el segundo (con el que comparó sus datos) en la Universidad de Rochester, situada en Nueva York. Los mismos estaban separados entre sí por aproximadamente 1000 kilómetros. Weber afirmaba haber detectado 78 coincidencias entre ambos detectores en un intervalo temporal determinado, dando el análisis de estas coincidencias una desviación estándar de 2.6, lo que significa que una relación tal podría producirse por azar sólo una vez en cien. Ello permitía inferir que el pico registrado era una señal genuina, producto de una fuente común y, dando un paso más en la interpretación de los datos, era esperable afirmar que las coincidencias obedecieran a la detección de una onda gravitatoria y no simplemente el registro de ruido. Sin embargo, como afirma Franklin (cf. Franklin, 2002, p. 55), la coincidencia en el registro de los datos fue producto de un error, por cuanto existía una diferencia de 4 horas entre los registros de ambos detectores. El procesador que analizaba las coincidencias entre los instrumentos, no estando bien programado, no unificaba el marco de referencia temporal. Los investigadores de la Universidad de Rochester, entre ellos David Douglass, utilizaban, como es habitual, la hora de Greenwich (GMT), para llevar sus registros; Weber por su parte, tomaba como referencia el tiempo local de Maryland (EDST).⁵¹

La ausencia de unificación de la referencia temporal condujo a Weber a tomar como simultáneas señales que en rigor se produjeron con cuatro horas de diferencia. Dicho de otro modo, Dado que $GMT = EDST + 4 \text{ Hs}$, si una señal traspasa el umbral a las 10 A.M según el tiempo de Maryland, entenderemos que existe una coincidencia sólo si los registros del detector de Rochester muestran también un pico a las 14 P.M.

La correlación sideral también sufrió un destino poco afortunado. En efecto, en el último artículo publicado durante 1970 (cf. Weber, 1970) Weber afirmaba que las señales detectadas presentaban un efecto anisotrópico según los registros tomados en el transcurso de siete meses. La anisotropía de un conjunto de señales es un signo de que las mismas están siendo generadas en un lugar privilegiado del espacio, a diferencia de las señales isotrópicas que provienen por el contrario desde toda dirección, o desde cualquier dirección, sin destacarse tendencia alguna. Ahora bien, ¿Por qué deberían las

⁵¹ GMT: Greenwich Mean Time. EDST: Eastern Day Saving Time.

ondas de gravedad ser anisotrópicas? Supongamos que intentamos detectar las ondas de gravedad producida por un evento que sucede en una porción del espacio determinado. Podría pensarse que haya ciertas posiciones del detector en las que éste sea más sensible a la captación de la señal. Si suponemos que la fuente de las ondas detectadas se encuentra en el centro de la galaxia, como pretendió Weber en el artículo que mencionamos y, teniendo en cuenta la ubicación del detector en la superficie terrestre, la rotación de la Tierra sobre su eje, la traslación de la tierra alrededor del Sol, y que el detector es más sensible en los momentos en que su posición es perpendicular a la fuente,⁵² podremos predecir qué periodicidad debe manifestar la señal si es producto de la radiación gravitatoria emitida, por ejemplo, por un par de estrellas de neutrones ubicadas en el centro de la galaxia.

Weber afirmó que los picos registrados manifestaban una periodicidad de 24 horas. Pero dado que la Tierra es prácticamente transparente a la radiación gravitatoria- justamente de tal característica se derivan muchas de las dificultades del experimento- la evidencia presentada por el científico constituye nuevamente un error, ya que la periodicidad debería encontrarse cada 12 horas, en los momentos del día en que el detector se orienta normal a la fuente emisora. Las horas en que la periodicidad se esperará dependerán a su vez, desde luego, del momento del año solar, ya que la posición de la Tierra respecto del centro de la galaxia se modificará conforme ésta orbite en torno al Sol.⁵³

Por lo dicho entendemos que la anisotropía de las señales representaba un fuerte argumento para descartar que las mismas fueran producidas en el laboratorio en el caso del mal funcionamiento del instrumento o a raíz de perturbaciones sísmicas locales. Sobre el valor de esta correlación, James Levine dice:

Cuando relacionó las señales con el tiempo sideral por un período de siete meses, encontró un pico en el momento en que el eje más sensible de la antena estaba dirigido hacia el centro de la galaxia, mientras que no encontró pico alguno al relacionar los mismos datos con el tiempo local. [...] Ciertamente, esta fue la afirmación más persuasiva de la detección de ondas de gravedad de origen extra-

⁵² Teniendo en cuenta que lo que sigue no requiere entender las razones por las cuales el instrumento es más sensible en dicha posición, omito la explicación correspondiente, que técnicamente compleja, desviaría la atención del lector del problema central que aquí tratamos sin redundar en una mejor comprensión del mismo.

⁵³ Para una explicación detallada de la correlación sideral véase Collins, (2004), p. 91 y ss.

terrestre. Como he dicho antes, esta afirmación fue probablemente la responsable de convencer a muchos experimentalistas a sumarse a la investigación. (Levine, 2004, p. 49).

Sin embargo, como hemos visto, la anisotropía esperable para el caso debía reflejarse en una periodicidad de 12 horas y no en una de 24, como pretendió Weber. Más allá de este error, y a pesar de la importancia de esta correlación, los artículos posteriores del físico, en los que presentaba nuevos datos, dejaron de mencionar la periodicidad. A modo de justificación, afirma en un artículo publicado en la revista *Nature*:

Efectos pequeños en el entorno local pueden afectar la anisotropía de manera significativa. Para calcular esto, se requieren al menos seis meses de registros. Las cintas consideradas aquí no tienen la continuidad requerida. Algunas lagunas y problemas en la grabación impiden el estudio de la anisotropía. (Weber, 1972, p.30).

Con ello, uno de los elementos de mayor fuerza probatoria desaparecía, tras lo que podemos entender como una justificación meramente *ad hoc*.

Hasta aquí nos hemos detenido en aquellos elementos de mayor poder confirmatorio, que tomamos como responsables de los intentos de otros grupos de científicos para sumarse a la investigación. Antes de que la *evidencia* aportada se considerase espuria, diversos grupos comenzaron a publicar resultados en conflicto con los que Weber había presentado. Se suma entonces al *desvanecimiento de la evidencia* un conjunto de resultados negativos que comentaremos a continuación y una serie de errores que Weber cometiera que se añaden a los anteriormente expuestos.

Diversos grupos, tras la publicación en 1970 en la que se mencionaba la existencia de una correlación sideral, construyeron detectores de ondas de gravedad. Entre ellos podemos citar a: Richard Garwin y James Levine en IBM, David Douglas en el laboratorio Bell, en Rochester, quien colaboró estrechamente con Weber intercambiando datos para el análisis y buscando coincidencias en las señales obtenidas por sus respectivos instrumentos; R. Drever, J. Hough, R. Bland y G. Lessnoff en

Glasgow y H. Billing, P. Kafka, K. Maischberger, F. Meyer y W. Winkler en Munich-Frascatti. Asimismo, tanto en Tokio como en Moscú, diversos experimentalistas se sumaron a la búsqueda de estas *ondas esquivas*. De los seis grupos de trabajo mencionados, ninguno halló señales que pudieran atribuirse a ondas de gravedad. Veamos las conclusiones de Allan Franklin respecto de los resultados negativos de los restantes equipos de investigación:

Resumamos la situación evidencial concerniente a las ondas de gravedad a comienzos del año 1975. Los resultados eran discordantes. Weber informó resultados positivos, mientras que otros seis grupos no informaron evidencia para la radiación gravitatoria. Los resultados de los críticos no sólo eran más numerosos, sino que además habían sido intercambiados y chequeados cuidadosamente. Los grupos intercambiaron tanto los análisis de datos como los programas para efectuar tales análisis y confirmaron los resultados [negativos]. (Franklin, 1999, p. 247).

También resultó problemática la elección de la técnica para el procesamiento de las vibraciones en el instrumento. Como mencionamos al describir el experimento de Weber, cuando una onda gravitatoria impacta en un detector, produce una vibración que debe ser amplificada y procesada. Existe entonces asociada a la antena, un sistema que permite transducir lo captado, un procesador que convierte y amplifica la señal proveniente de la radiación en un pulso susceptible de registrarse. Así como en las comunicaciones telefónicas, en las que las ondas sonoras emitidas por la fuente emisora son transducidas en señales eléctricas que vuelven a transducirse en vibraciones sonoras en el receptor, las vibraciones producidas en el detector son transducidas a señales eléctricas. Este componente del instrumento que posibilita el procesamiento de la señal es lo que se conoce habitualmente como *su electrónica*. En el caso que estudiamos, Weber apeló al procesamiento por medio de un demodulador cuadrático (no-lineal), mientras que los restantes equipos utilizaron procesadores lineales. Toda onda se caracteriza por su amplitud, su fase y su frecuencia. El impacto de la radiación gravitatoria en un detector, que como señalamos anteriormente es básicamente un oscilador armónico, perturbará su estado de oscilación, añadiendo energía a la ya presente en la antena y modificando ya sea la amplitud, la fase o ambas

simultáneamente en la salida del detector. Existen dos tipos de procesadores de señales: los cuadráticos y los lineales. El primero, utilizado por Weber, detecta únicamente cambios en la amplitud de la señal registrada. El procesador lineal, por el contrario, permite estudiar tanto la variación en la amplitud como en la fase. Todos los investigadores, excepto Weber, utilizaban el procesador lineal, explicando que el algoritmo no-lineal (cuadrático) no permite separar correctamente la señal del ruido, y que, inclusive, permite que señales de otras frecuencias interfieran en la detección. Levine por ejemplo considera que el demodulador no-lineal:

Hace imposible medir la fuerza de la señal de la radiación gravitatoria excepto si ésta es mucho mayor que el ruido. (Levine, 2004, p.53).

Según Franklin, la elección del modo de procesamiento de las señales fue sesgada. Dice al respecto:

[...] Weber prefirió el algoritmo no-lineal. Su razón para esto residía en que proporcionaba una señal más significativa que el algoritmo lineal. [...] Weber enfatizó: “Claramente estos resultados [el hallazgo de altos flujos de ondas de gravedad] son inconsistentes con la idea generalmente aceptada de que $x^2 + y^2$ [el algoritmo lineal] debe ser el mejor algoritmo.” Weber, de hecho, estaba utilizando el resultado positivo para decidir cuál era el mejor procesamiento de la señal. Estaba cambiando el procedimiento con el fin de maximizar el resultado. (Franklin, 2002, p.57).

Weber defendió su elección apelando a características especiales de las ondas de gravedad que justificarían la elección del procesador cuadrático. Ello llevó a los restantes investigadores a procesar sus datos con ambos métodos de demodulación, obteniendo tanto con uno como con el otro, resultados nulos. Esto requiere una nueva cita de Allan Franklin:

Weber tenía una respuesta. Admitió que el algoritmo lineal era más eficiente en la detección de pulsos de calibración, que eran pulsos cortos. Afirmó sin embargo, que la señal real de una onda gravitatoria era un pulso más largo de lo que la

mayoría de los investigadores creían. Si la señal era más larga de lo esperado, entonces uno esperaría que ésta apareciese cuando los críticos procesaron sus datos con el algoritmo no-lineal. Cosa que no sucedió. (Franklin, 1999, p. 247).

Otro elemento problemático y cuestionable en la conducción del experimento en Maryland residía en el modo de fijar el umbral a partir del cual una señal se podría interpretar como la captación de una onda gravitatoria. La elección del umbral, si bien supone una decisión, no es arbitraria; de lo que se trata aquí es de hallar un punto –un valor en una escala- en el cual la energía de la barra sea causada no sólo por perturbaciones locales (ruido térmico, sísmico y electromagnético, etc.). Si el umbral es muy elevado, se corre el riesgo de no tener en cuenta cambios en los registros que puedan ser producto de ondas de gravedad, si, por el contrario, el umbral es bajo, se tomarán como ondas cambios que son tan sólo accidentales. El dilema reside en qué hemos de privilegiar: si ser víctimas de un error de tipo I, es decir, obtener un falso positivo por establecer un umbral muy bajo, o cometer un error de tipo II, en el que un falso negativo se produce por fijar un umbral alto de detección. Más allá de la complejidad involucrada en la determinación del umbral adecuado, es de esperar que, una vez precisado, el mismo permanezca constante en la toma de registros. Una de las críticas al trabajo de Weber tuvo que ver con el hecho de publicar histogramas sin especificar el valor del umbral, pudiendo entonces modificarlo sólo con el propósito de maximizar la señal (cf. Franklin, 2002, p.59 y ss.).

También se ha criticado al experimento de Weber –aunque no fue un factor decisivo en el rechazo de los resultados presentados- en virtud de la ausencia de calibración de los instrumentos utilizados (cf. Franklin, 1999, p. 244 y ss.). Según la investigación de Allan Franklin, el instrumento de Weber no era capaz de detectar los pulsos de calibración, mientras que los restantes equipos calibraban sus aparatos de medición en cada toma de datos. Esto, sin embargo, no es tan claro. En primer lugar, Sinsky, colaborador de Weber en los primeros años de la investigación, diseñó un complejo sistema de calibración con un emisor de ondas de gravedad, es decir un dispositivo similar al instrumento original, pero montado sobre un eje rotatorio. Teniendo en cuenta que la fuente de ondas es conocida, puede calcularse teóricamente lo que debería detectar un equipo que funcionase apropiadamente (cf. Weber, 1960). Desde luego, la calibración por este sistema se realizó antes de comenzar a registrar datos, y por sus

características, no puede utilizarse en cada nueva corrida experimental. El resto de los equipos, por el contrario, apelaron a la calibración en tiempo real pero partiendo de la introducción de pulsos acústicos. Detrás de tal decisión hay un supuesto teórico fuerte respecto de las características de las ondas de gravedad y su similitud con las ondas acústicas. Como indica Franklin:

En situaciones ordinarias, el fracaso de la calibración en el experimento de Weber, hubiese sido decisivo. Pero dado que el episodio es atípico –en el que se utiliza un nuevo tipo de aparato para buscar un fenómeno nunca observado- el problema de la calibración no fue concluyente. Se requirieron y proveyeron otros argumentos para resolver el conflicto. (Franklin, 2002, p.64).

La calibración de los instrumentos, en este episodio, presenta dos problemas que están asociados. El primer problema radica en la elección del tipo de pulsos que se utilizarán para calibrar el instrumento y la postulación de una semejanza entre éstos y las ondas de gravedad; con ello, surgen dudas respecto de la importancia de detectar los pulsos de calibración, puesto que si las señales no son similares, la calibración no será indicador del buen funcionamiento del arreglo experimental. El segundo problema está relacionado con el método para amplificar las señales y su incidencia en la detección de pulsos de calibración. El sistema de demodulación de señales preferido por Weber no era capaz de registrar los pulsos acústicos de calibración, mientras que el procesamiento de las señales por medio del algoritmo lineal captaba claramente el pico proveniente de las ondas introducidas.

Por último, nos interesa mencionar –aunque no nos detendremos en ello- que una de las críticas al experimento de Weber y a la pertinencia de los resultados del mismo se relacionó con la proporción entre el ruido y la señal en el transcurso de las modificaciones de los aparatos utilizados. Es de suponer que, con el aumento de sensibilidad de un detector, éste será más susceptible a señales genuinas, y estará, a su vez, mejor preparado para filtrar el ruido en sus diversas formas. Sin embargo, en este caso, no se registró una relación de proporcionalidad directa entre aumento de sensibilidad y captación de señales.

Las razones del rechazo de los resultados que proporcionara Weber encuentran, según entendemos, su fundamento en factores internos –es decir, epistemológicos- a la

comunidad científica. La evidencia presentada por el físico no resistió el escrutinio de los críticos, los errores cometidos fueron numerosos, aunque comprensibles dada la dificultad del experimento y teniendo en cuenta que Weber fue un pionero en el área. Lamentablemente, así como el reconocimiento de la comunidad científica hubiese sido la recompensa en caso de ser sus resultados sólidos, el fracaso de la investigación no pasó inadvertido, a punto tal que Weber ya no pudo publicar nuevos artículos en *Physical Review Letters*. De hecho los últimos trabajos que escribió sobre el tema, aparecieron en revistas como *Nature*, que si bien es tan prestigiosa como la anterior es una publicación no especializada, para finalmente presentar sus resultados en revistas tales como *Scientific American* y *Physics Today* que, como es de conocimiento general, son básicamente divulgativas.

5.5 La interpretación de los resultados

Tras este excursus, destacaré a continuación los elementos que requiero para proseguir con el análisis de la conformación de un resultado experimental para el caso de los experimentos existenciales. En primer lugar, la existencia de las ondas de gravedad se determinará a partir de una de las consecuencias que tendrían en una barra resonante. El impacto de una onda de gravedad en la antena modificará el modo de vibración de la misma y esta variación en el modo de vibración será transducido en voltaje gracias a los cristales piezoeléctricos conectados a la barra. De modo que aquello que efectivamente se medirá en el experimento que analizamos es la variación del voltaje en función del tiempo. En segundo lugar los voltajes serán grabados, analizados y modelados con el fin de considerar sólo aquellos que no pueden explicarse apelando a otras fuentes de vibración de la barra. Esta información, a su vez, será convertida en una variación de amplitudes y para ello, será necesario incorporar un procesador de señales. Finalmente, los datos se someterán a un análisis estadístico para determinar si la desviación de los datos respecto de lo esperado en el caso en que la hipótesis nula fuese verdadera es significativa.

En el experimento que estamos considerando, encontramos, en primer lugar, un *output*, es decir, ciertos trazos impresos sobre papel continuo. La afirmación final del

experimento es que se ha detectado un exceso de siete picos por día por sobre el umbral que sólo puede ser atribuido a ondas de gravedad.

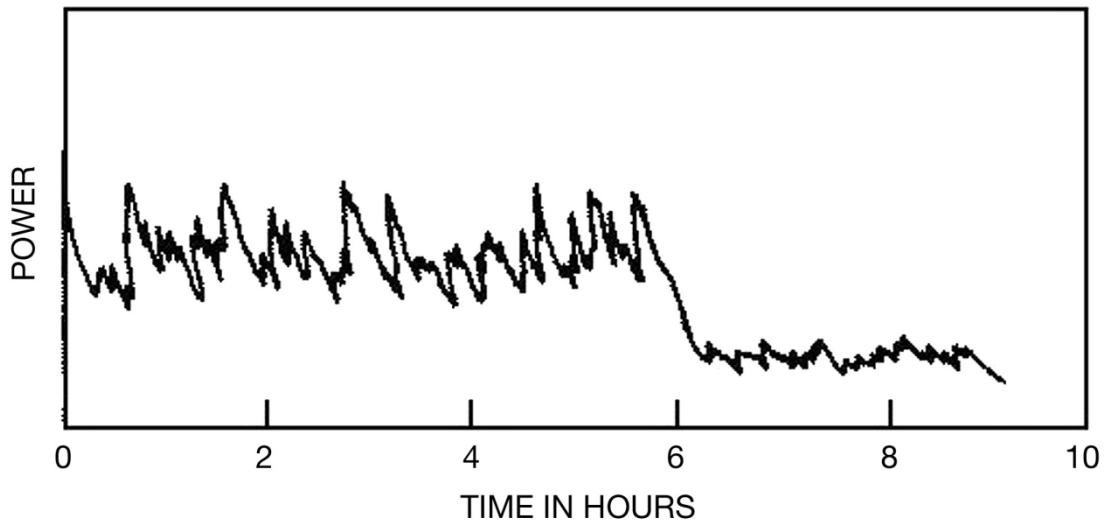


Figura 8. Una muestra de los *outputs* del experimento de Weber.

Tomado de Levine (2004), p. 47.

¿Cuáles son los pasos interpretativos que permiten el pasaje del *output* al resultado final del experimento? Los trazos sólo adquieren sentido cuando son relacionados con su modo de producción y cuando se los relaciona con el papel que desempeñan los cristales piezoeléctricos y cómo se espera que éstos se comporten dada la resonancia de la antena. El *output* adquirirá parte de su significado al subsumirlo bajo un concepto métrico, determinando qué tipo de información es relevante para los propósitos del experimento. Para realizar dicha interpretación es preciso tener en cuenta que si una onda de gravedad impacta en el detector, éste se alejará de un estado de equilibrio, a causa de la tensión que imprimirá la onda de gravedad en la antena y, correlativamente, inducirá una alteración en las posiciones relativas de las partes de la barra. Intentando regresar al equilibrio, la barra realizará trabajo y se producirá una fuerza de recuperación (*restoring force*). Los cristales piezo-eléctricos transducirán esta fuerza en voltaje, que será registrado, y constituye el *dato* en este experimento. La variación de voltaje, a su vez, puede ser expresada en términos de las amplitudes y las fases de los

estímulos incidentes. Los estímulos pueden ser de los más diversos tipos, desde las fuentes de ruido que ya examinamos hasta el impacto mismo de una onda de gravedad.

La transducción del voltaje en variación de amplitudes y fases de ondas incidentes está posibilitada por nuestra comprensión de las ondas en general y a partir de la consideración de lo que conocemos acerca de las leyes que gobiernan los fenómenos eléctricos y el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Finalmente, dado que muchos de los *inputs* son simplemente ruido, el registro se modelará apelando a una serie de Fourier que garantizará que los picos por sobre el umbral pero debidos al ruido no serán contemplados en el análisis estadístico, proporcionando lo que llamaremos *e-resultado*. Si este último elemento se considera estadísticamente significativo, se procederá a afirmar que se han detectado ondas de gravedad y el registro será conceptualizado desde la teoría general de la relatividad, obteniéndose entonces lo que llamaremos el *t-resultado* del experimento.

Hemos estudiado en la sección 5.4 que el resultado experimental al que arriba Weber se considera erróneo. ¿Por qué lo hemos elegido, entonces? Básicamente, porque estamos interesados en analizar el concepto de *resultado experimental*, no el concepto de *resultado experimental correcto*, de modo que el modelo debe poder aplicarse por igual independientemente de la corrección de los mismos.

*Tercera parte: La autonomía de la experimentación y el regreso del
experimentador*

La vida propia del experimento como estrategia filosófica

6.1 Introducción

Este capítulo es, en algún sentido, una suerte de plataforma dialéctica. Aquí se articularán un conjunto de tesis filosóficas, se presentarán problemas vinculados con la defensa o rechazo de éstas, las posibles soluciones presentadas en la literatura y, cuando estas soluciones no se consideren aptas, se presentarán las críticas pertinentes y se anticiparán nuestras propias propuestas. Con ello, aquí nos interesa especialmente preparar el camino argumentativo para guiar y facilitar la lectura de los próximos capítulos. Esto es lo que haremos:

- 1) Presentaremos las diferentes formas de autonomía de la experimentación que se han defendido en la literatura, todas ellas *escondidas* tras el eslogan omniabarcativo que popularizara Ian Hacking: *Experiment has a life of its own*.
- 2) Mostraremos cómo la tesis de la autonomía de la constitución (*c-autonomía*) puede pensarse como una tesis derivada de los intentos contemporáneos por dar respuesta al problema de la carga teórica de la observación.
- 3) Presentaremos el *regreso del experimentador* que propusiera Collins en su (1985). En nuestro análisis, defenderemos que lo que habitualmente se entiende en la literatura como el *argumento del regreso del experimentador*, no es uno, sino dos argumentos: el argumento del *regreso del experimentador en la replicación (AREr)* y el argumento del *regreso general del experimentador (AREg)*, el segundo, como su nombre lo indica, es más abarcativo e implica al primero.
- 4) Mostraremos que la *c-autonomía* nos impide dar una respuesta adecuada al *AREg*. Una propuesta que hace justicia a la cuota de verdad detrás de la carga teórica y, al

mismo tiempo, a la idea de la estabilidad de los resultados experimentales se ofrecerá en el capítulo 8 de esta tesis.

- 5) Mostraremos que la autonomía de la justificación (*j-autonomía*) nos permite defender que aun si las premisas que componen *AREr* fuesen verdaderas, de ello no se seguiría que no pueda ofrecerse un quiebre al regreso en términos internos a la práctica científica. Cómo esto se logra, será tratado en el capítulo 9.

6.2 Las muchas vidas del experimento

En el capítulo I (§ 1.3) habíamos señalado que uno de los temas centrales en el ámbito de la filosofía de la experimentación es la pregunta por la relación entre teorías y experimentos. Ahora que hemos tenido la oportunidad de ver cómo la teoría se hace presente en la experimentación, podemos pasar a explorar esta relación tal como se ha comprendido en la literatura. Continuaremos presentando las diferentes posiciones en torno a *la vida propia del experimento*, rastreando las formas que adopta la tesis de la autonomía de la experimentación y las razones que conducen a los diferentes filósofos involucrados en esta discusión a defender alguna forma de autonomía para la práctica experimental.

Desde la publicación del libro *Representing and Intervening* (Hacking, 1983) la afirmación según la cual los experimentos son autónomos respecto de las teorías fue repitiéndose en la literatura especializada. El uso del eslogan *los experimentos poseen una vida propia* se extendió especialmente entre los epistemólogos de raigambre empirista, sin que ello fuese acompañado por un análisis profundo de la autonomía mentada. Aun cuando esta expresión aparece mencionada, afirmada o negada en numerosos artículos y libros,⁵⁴ casi no hay trabajos específicos que discutan con detalle en qué consiste la tesis de la autonomía de la experimentación, cuáles son sus supuestos, ni cuáles son sus implicaciones.⁵⁵

⁵⁴ Como por ejemplo, Franklin (2005); Galison (1987); Giere (1985); Hacking (1983); Heidelberger (2003); Hon (1989) y (2003); Mayo (1996); Radder (2003) y Steinle (1997).

⁵⁵ Hasta el momento en que escribimos este trabajo, hay sólo dos trabajos publicados en los que se analiza la autonomía de la experimentación y se la discute brevemente, pero en ningún caso se ofrece un análisis exhaustivo. Me refiero a Carrier (1998) y Ferreirós y Ordoñez (2002).

Son muchas las maneras en las que la autonomía de la experimentación puede entenderse y diversas las conclusiones que es posible extraer dependiendo de cómo se precise la tesis. Como anticipamos en el capítulo primero (§1.3), es posible recuperar al menos cinco usos principales de la *vida propia del experimento* que los epistemólogos no parecen haber distinguido explícitamente y que denominaré del siguiente modo:

- 1) Autonomía funcional.
- 2) Autonomía constitutiva.
- 3) Autonomía epistémica.
- 4) Autonomía pragmática.
- 5) Autonomía cultural.

En primer lugar, la vida propia del experimento puede pensarse como una tesis acerca de la función de los experimentos, y así parece sugerirlo Hacking (1983, cps. 9 y 13). En este caso, la autonomía de la experimentación se propone como una afirmación empírica que buscaría refutar la tesis popperiana, según la cual la función de la experimentación es exclusivamente la contrastación de teorías científicas (Popper, 1959, § 30). Es precisamente en contraposición al teoreticismo popperiano que Hacking destacará –apelando a la historia de la ciencia– que numerosos experimentos fueron conducidos sin el propósito de poner a prueba una hipótesis o teoría, sino para explorar fenómenos intrigantes. La tesis de la autonomía funcional también está presente en Steinle (1997 y 2002) y presupuesta en su distinción entre experimentos exploratorios y experimentos teóricamente guiados. Los primeros, según Steinle, son propios de los procesos de formación de conceptos científicos y, por lo tanto, no buscan poner a prueba hipótesis alguna, sino lograr un desarrollo conceptual que permita comprender un dominio de fenómenos nuevos o poco conocidos. También Heidelberger (1998) defiende la autonomía funcional.

En segundo lugar, la lectura más cara a los pensadores de filiación empirista es la idea según la cual los resultados experimentales persisten frente al cambio teórico.⁵⁶ Si bien los *nuevos experimentalistas* no son explícitos al respecto, esta tesis presupone una forma de autonomía respecto de la constitución de la evidencia empírica (en adelante, *c-autonomía*), es decir respecto del modo en el que los *outputs* obtenidos en el transcurso

⁵⁶ Cf. Mayo (1996); Galison (1997); Hacking (1983); Steinle (1997) y (2003).

de un experimento adquieren significado. Resulta evidente que sólo si los resultados experimentales son teóricamente neutrales –en un sentido de autonomía teórica a ser precisado- no serán modificados en el curso de un proceso de cambio teórico. Si bien los autores antes mencionados defienden la *c-autonomía*, no hacen un esfuerzo por dar con una semántica de los resultados experimentales (es decir, con los pasos interpretativos necesarios para dotar de contenido proposicional a un *output*) que permita precisar en qué sentido un resultado es teóricamente neutral. Uno de los objetivos del capítulo ocho será ofrecer dicha semántica, apoyándonos en los casos históricos que presentamos en la primera parte de este trabajo.

El análisis de la autonomía respecto de la constitución de la evidencia empírica resulta relevante no sólo por la importancia que posee para el desarrollo de una filosofía sustantiva de la experimentación, sino también cuando se lo piensa en el contexto de la discusión respecto de la carga teórica de la observación, y, más aún -como tendremos oportunidad de analizar más adelante- será crucial al momento de ofrecer una respuesta adecuada a la versión general del argumento del regreso del experimentador, algo que pasó inadvertido para los filósofos del experimento que sostienen esta forma de autonomía.

En tercer lugar, la autonomía de la experimentación (*j-autonomía*) puede concebirse como una tesis acerca de la justificación de la evidencia experimental, y así parecen entenderlo tanto Deborah Mayo (1996, cp. 3) como Allan Franklin (1989 y 2005). Mostrar que esta forma de autonomía es posible, nos brindaría razones para resistir las conclusiones de los constructivistas sociales, quienes sostienen, como indicamos en el primer capítulo de este trabajo, que la aceptación de la evidencia empírica se basa en criterios extra-epistémicos. En este caso, la satisfacción de la autonomía respecto de la justificación de la evidencia empírica, permitiría ofrecer una respuesta alternativa a la explicación de carácter relativista que se propone frente a la ocurrencia del regreso del experimentador en la replicación, algo que estudiaremos en el capítulo noveno.

El cuarto sentido con el que la tesis de la autonomía ha aparecido en la literatura es aquel según el cual la autonomía de la experimentación puede leerse como una tesis que pone de relieve el contraste entre el trabajo del teórico y el del experimentador. Fueron especialmente Hacking (1983) y Galison (1997) quienes destacaron *la vida propia del experimento* enfatizando las diferencias pragmáticas entre la experimentación y la teorización. La teorización y la experimentación son autónomas, afirman, en la medida en que suponen prácticas diferentes. Para Hacking, además, la autonomía pragmática

queda recuperada en los diferentes recursos empíricos a los que apela el experimentador para determinar si aquello que ha detectado es real o es un artefacto, para lo que se vale, por ejemplo, del *argumento de la interferencia* y el *argumento de la confirmación independiente* (1983, cp. 11). En el capítulo noveno, incluiremos y analizaremos las prácticas asociadas a los argumentos mencionados como una forma de ejemplificar la *j-autonomía*.

La quinta forma de autonomía, finalmente, es aquella según la cual las diferentes prácticas propias de la labor de los teóricos y de los experimentalistas implican compromisos epistémicos y metafísicos que no coinciden necesariamente. Fue Peter Galison quien postuló esta forma de autonomía, especialmente en su (1997) pero también en artículos como, por ejemplo, *Context and Constraints* (1995).

Como señalamos en el capítulo primero, la autonomía funcional, la autonomía pragmática y la autonomía cultural, si bien relevantes en la medida en que aportan información valiosa respecto de cómo funciona la investigación científica en general y de las diferencias entre teorización y experimentación en tanto que actividades, en particular; se limitan a mostrarnos como *de facto* es la práctica científica, y no dejan de ser, por lo tanto, tesis empíricas. Puesto que este trabajo no es un trabajo de campo ni antropológico, ni histórico, ni sociológico, no nos ocuparemos de aportar evidencia a favor ni en contra de la verdad de dichas afirmaciones, y sólo nos limitaremos a señalar que son conceptualmente viables y que poseen evidencia empírica a su favor. Sí nos detendremos en el análisis de aquellas elucidaciones que poseen contenido conceptual sustantivo, esto es, la autonomía constitutiva y la autonomía epistémica.

En nuestra investigación analizaremos, por tanto, dos de las cinco formas de autonomía presentadas: la *c-autonomía* y la *j-autonomía*. En el capítulo octavo mostraremos en qué consiste la autonomía de la constitución de la evidencia empírica, quiénes son sus defensores y quiénes sus detractores y propondremos una semántica de los resultados experimentales basándonos en los estudios de casos que presentamos en la segunda parte de esta investigación, lo que nos permitirá precisar en qué sentido un resultado experimental puede ser autónomo y en qué sentido no puede serlo. Finalmente, en el capítulo nueve, analizaremos la tesis de la autonomía respecto de la justificación y la complementaremos con una reconstrucción crítica de *la epistemología del experimento*, analizando, criticando y realizando mi propia contribución tomando como punto de partida las propuestas de Allan Franklin (1986, 1990, 1999, 2005), Peter Galison (1987), Ian Hacking (1983) y Deborah Mayo (1996).

6.3 Las motivaciones para la defensa de la *c-autonomía*

Como sabemos, para la tradición empirista de la filosofía de la ciencia contemporánea el lenguaje observacional era teóricamente neutral;⁵⁷ mientras que para el historicismo la observación, y, en consecuencia, el lenguaje observacional, estaban *cargados de teoría*. De cara a este escenario, los *nuevos experimentalistas* intentaron recuperar, una vez abandonada la distinción clásica entre un vocabulario teórico y un vocabulario puramente observacional (y las restantes distinciones que pueden establecerse sobre la base de ésta), la plausibilidad de la persistencia transteórica de los resultados experimentales. Ahora bien, precisar qué es aquello que persiste (y, paralelamente, en qué medida se satisface la *c-autonomía*) requiere un estudio detallado de la constitución de un resultado experimental, algo que no se ha explorado en la literatura sobre el tema.

El *locus* clásico para la afirmación según la cual “*toda observación está cargada de teoría*” es el libro de Hanson, *Patterns of Discovery* (1958) si bien Feyerabend (1958) ya había defendido esta idea un poco antes, y Duhem en su clásica obra de 1906 ya la había aplicado al caso específico de la experimentación en la física (Duhem, 1906). Aunque Hanson reconoce la influencia que las ideas de Duhem tuvieron en su producción filosófica, su posición es mucho más radical. Mientras que el autor de *La théorie physique* afirma la existencia de dos momentos en la observación científica: la percepción y la interpretación teóricamente mediada de lo percibido, Hanson considera que esa distinción no puede trazarse. Para él *observar* es necesariamente *interpretar* a la luz de las teorías aceptadas. Hanson afirma (1958, pp.7-8), tomando el caso de la astronomía moderna clásica, que Tycho Brahe y Kepler no observan lo mismo cuando dirigen su mirada al firmamento durante el amanecer. En efecto, según Hanson: *Tycho y Simplicio ven un Sol móvil, Kepler y Galileo, un Sol estático*.

Ahora bien, dado que, según estos autores, las observaciones son teórico-dependientes, parece correcto afirmar que la base empírica no es estable y que, en el caso específico de la experimentación, el cambio teórico implica un cambio del significado de los resultados experimentales. Lo empírico pierde entonces su carácter de fundamento epistémico, excepto si podemos mostrar que el concepto mismo de

⁵⁷ Otto Neurath –haciendo hincapié en el vocabulario observacional como *ballungen-* representa una excepción temprana. Discuto esta divergencia respecto del resto de los integrantes del Círculo de Viena en mi (2011). Para un estudio en detalle del pensamiento y los aportes de Neurath sugiero Cartwright, N.; Cat, J. y Uebel, T. (1996).

resultado experimental es un concepto mucho más rico y complejo que el que los historicistas consideraban. Este es uno de los objetivos de nuestro trabajo.

Ahora bien: ¿cuál es la estrategia de los filósofos analíticos de la experimentación para rechazar la dependencia teórica de la observación? Consideremos por ejemplo la posición de Hacking. El autor expone el problema en los siguientes términos:

Algunos lugares comunes acerca de la observación se distorsionaron gracias a dos tendencias filosóficas. Una es la moda de lo que Quine llama *ascenso semántico* (no hablemos de las cosas, hablemos acerca de la forma en que hablamos de las cosas). La otra es la dominación del experimento por la teoría. La primera moda nos insta a no pensar en la observación, sino en los enunciados observacionales. La segunda indica que todo enunciado observacional está cargado de teoría. –No hay observación previa a la teorización. (Hacking, 1983, p. 167).

La estrategia de Hacking consistirá, en primer lugar, en destacar el uso laxo del concepto de *teoría* en los trabajos de Feyerabend. En segundo lugar, en defender que muchas observaciones en la historia de la ciencia no incluyeron supuestos teóricos, es decir, ofrecer un contraejemplo a la tesis -de carácter general- de la carga teórica de la observación. Y, en tercer lugar, en destacar la relevancia de la acción en la experimentación. Afirma Hacking argumentando contra Feyerabend:

Por supuesto, si se quiere llamar teoría a cada creencia, protocreencia o creencia que pudiera inventarse, puede hacerse. Pero entonces la tesis de la carga teórica sería trivial. *Ha habido importantes observaciones en la historia de la ciencia que no han incluido supuestos teóricos en absoluto.* (1983, p. 175-176, cursivas nuestras).

Y continúa luego:

En su libro más famoso, *Against Method* [...], Feyerabend dice que no tiene sentido hacer la distinción entre teoría y observación. [...] También leemos algo que suena a la doctrina de la “carga teórica” en toda su fuerza: “Los informes observacionales, los resultados experimentales, ‘las oraciones fácticas’, o bien *contienen* supuestos teóricos, o bien se afirman por la manera como se usan” [...]. Estoy en desacuerdo con lo que aquí se dice, pero antes de explicar por qué, quiero

anular algo que este tipo de comentarios sugieren. Dan la idea de que los resultados experimentales agotan lo que es importante en un experimento y que los resultados experimentales se formulan o incluso se constituyen por medio de informes de observaciones o “enunciados fácticos”. Voy a insistir en la perogrullada de que experimentar no es describir o informar, sino hacer –y no hacer cosas con palabras. (1983, p. 173, cursivas en el original).

Hacking cuestiona entonces si este conjunto de elementos a los que Feyerabend se refiere en la cita, es decir, los informes observacionales, las oraciones fácticas y los resultados experimentales son el mismo tipo de elemento, y responde negativamente.

Refiriéndose al experimento de Michelson Morley, afirma:

El experimento de Michelson-Morley tiene la ventaja de ser bien conocido. [...] Las *observaciones* se hicieron en el curso de unas horas los días 8, 9, 11 y 12 de julio. Los *resultados* del experimento son notablemente controvertidos. Michelson pensó que el resultado principal era la refutación del movimiento relativo de la tierra respecto del éter. [...]. Podríamos decir que el experimento duró medio siglo mientras que las observaciones se realizaron en tan sólo un día y medio. Más aun, el resultado principal del experimento, aunque no es un resultado experimental, fue la transformación radical en lo que concierne a las posibilidades de medición. Michelson obtuvo un premio nobel por esto, no por el impacto de sus resultados sobre las teorías del éter. (Hacking, 1983, p. 174).

En efecto, uno debe preguntarse, ¿poseen todos ellos el mismo tipo de carga teórica? Porque aun si los resultados experimentales fuesen lo único relevante en un experimento, podríamos seguir defendiendo que son, al menos en parte, y en un sentido a ser todavía precisado, teóricamente neutros, algo que exploraremos en detalle en la sección 8.2 de este trabajo. Y, apelando a las distinciones necesarias, mostrar que ello es compatible con la incidencia de la teoría en la constitución de los resultados experimentales. Entonces, podríamos preguntarnos: ¿qué es aquello que se observa como salida del dispositivo experimental y que ha permanecido robusto? Pero también: ¿qué representa ese *output* dado este arreglo experimental? Para dar respuesta a esta última pregunta se vuelve necesario recurrir a un conjunto de teorías científicas que nos permitirán comprender qué ocurrió en el experimento. Como veremos, constituir un resultado experimental es cargarlo de teoría. La práctica experimental es viable como

método para la adquisición conocimiento científico en la medida en que es pasible de interpretación teórica. Hasta aquí prácticamente querría coincidir con Hacking. Sin embargo, unas páginas más adelante, y discutiendo ahora con Hanson, afirma:

Existe una tendencia a inferir, a partir de historias como la del positrón, que todo aquel que indica, mirando una placa fotográfica: “eso es un positrón” está por ello presuponiendo o afirmando muchísima teoría. No creo que sea el caso. Un asistente puede ser entrenado con el fin de reconocer esas trayectorias [*tracks*] sin tener idea alguna de la teoría. (1983, p. 179).

Podemos reconocer un positrón si nos han entrenado para ello, sin utilizar teoría para reconocerlo. Sí, desde luego; pero el primer investigador en establecer el tipo de trayectoria propia de un positrón ¿pudo diferenciar un positrón como tal entre las restantes marcas presentes en una placa sin apelar a información de carácter teórico? ¿Es posible individuar a un positrón *qua* positrón sin apelar a una interpretación teórica? ¿Es posible ver la marca que un positrón deja en una placa fotográfica? En este punto sí coincidimos con Hacking. La marca, pero no la marca en tanto que el paso de un positrón.

Hasta aquí la respuesta de Hacking. En ella, el autor se compromete con la posibilidad de observaciones pre-teóricas y con la diferencia entre observaciones y resultados experimentales, sin embargo, no aclara en qué radica esta diferencia ni cuál es el proceso que nos permite, a partir de una observación, constituir un resultado experimental. Cuando en el capítulo octavo analice la tesis de la autonomía de la constitución de la evidencia empírica, propondré una semántica para los resultados experimentales, elucidando los pasos interpretativos implicados en los experimentos exploratorios tomando como base empírica los casos analizados en los capítulos anteriores y proporcionando, a partir de las conclusiones allí obtenidas, un análisis de *grano fino* acerca del concepto de *resultado experimental* que nos permitirá defender una forma de *c-autonomía* moderada y de espíritu compatibilista. Este análisis nos permitirá poner de manifiesto la incidencia de la teoría en la conformación de la evidencia empírica, sin por ello aceptar las consecuencias relativistas que los historicistas pretendían. A su vez, este análisis nos permitirá dar con una estrategia para

eludir *el regreso del experimentador* en su versión general. De introducir la tesis de Collins nos ocuparemos a continuación.

6.4 El regreso del experimentador y la vida propia del experimento

En el primer apartado de este capítulo, señalamos las diversas tesis que coexisten, confundidas, bajo el eslogan de la *vida propia del experimento*. Dos de ellas guardan vínculos (muy diferentes, como veremos) con sendas formas del *regreso del experimentador*. Por una parte, la *c-autonomía* es una tesis que, de sostenerse sin mayor precisión, no nos permite ofrecer una respuesta de carácter internalista al argumento del *regreso general del experimentador*, y, por ello, es una tesis que resulta imprescindible precisar y evaluar. Por otra parte, la *j-autonomía* se ha presentado, tradicionalmente, para bloquear las consecuencias relativistas de la incidencia del *regreso del experimentador en la replicación*. Ahora bien, para estar en condiciones de establecer las relaciones pertinentes, nos ocuparemos, en esta sección, de presentar los hallazgos que Harry Collins introduce en uno de los libros que lo volvió un sociólogo sumamente popular, *Changing Order*.

Desde la sociología de la ciencia y, probablemente, a partir de los resultados del *programa fuerte de la escuela de Edimburgo*, numerosos científicos sociales comenzaron a sugerir que la práctica científica está gobernada por elementos sociales, políticos y económicos, que no sólo condicionan los modos posibles de conducir una investigación, sino que determinan la corrección o incorrección de los resultados obtenidos en el transcurso de ésta.⁵⁸ La aceptación de un resultado experimental como adecuado y, por tanto, como evidencia empírica, es una consecuencia, según los constructivistas sociales, de negociaciones, intereses, pujas de poder y de prestigio entre los investigadores involucrados. Para los constructivistas sociales, los criterios internos nunca son condición suficiente para el establecimiento de un resultado experimental. Por el contrario, afirman, un resultado se establece a partir de factores externos a la

⁵⁸ En especial Collins (1985) y (2004); así como Collins y Pinch (1993). También comparten esta línea de pensamiento Latour y Woolgar (1979) entre otros sociólogos y etnometodólogos de la práctica científica contemporáneos.

práctica científica. Como defienden Harry Collins y Trevor Pinch en su libro *The Golem, What You Should Know About Science*:

Un argumento cuasi-filosófico muestra que ningún conjunto de resultados experimentales puede mantener su poder a la luz de reinterpretaciones de críticos comprometidos. O, para señalarlo de modo positivo, los datos experimentales mantienen su potencia bajo estas circunstancias sólo cuando no hay tales críticos. (Collins y Pinch, 1993, p. 176).

Frente a las preguntas ¿cómo decidir si un resultado experimental, obtenido en la investigación de frontera, es correcto?, ¿qué inconvenientes se presentan cuando intentamos determinar un resultado desconocido a partir de un instrumento diseñado específicamente para tal propósito?, Harry Collins adopta una actitud escéptica y relativista. Esta posición se sostiene a partir de su formulación del *argumento del regreso del experimentador*, la contrapartida discursiva de una regresión al infinito que sucedería en la actividad experimental de no mediar un quiebre. Este regreso, afirma Collins, obliga a determinar cuál es el resultado correcto de un experimento apelando a factores de carácter externo a la práctica científica, factores no-epistémicos, como, por ejemplo, sociales o económicos (cf. Collins 1975, 1985, 2004 y 2011).

Entendiendo, por el contrario, que la práctica experimental provee conocimiento confiable, que la justificación de los resultados está racionalmente garantizada, pero admitiendo, al mismo tiempo, que el argumento del *regreso del experimentador* podría llevarnos a cuestionar estas intuiciones, buscaremos en el próximo capítulo indicar en qué consiste dicho argumento, determinar cuál es el desafío que plantea a la racionalidad en la práctica experimental y proponer algunas respuestas y objeciones al mismo. Para ello distinguiremos, a pesar de lo que sugiere Collins, no uno, sino dos argumentos relacionados: un argumento por reciprocidad que denominaremos *regreso general* y una regresión al infinito que denominaremos *regreso en la replicación*. Analizaremos y discutiremos ambos argumentos así como los presupuestos involucrados.

En un artículo publicado en 1975 en la revista *Sociology*, Harry Collins ofrece un análisis de los problemas epistemológicos asociados a la investigación de la existencia o no de radiación gravitatoria (Collins, 1975). En ese artículo sienta las bases para lo que

posteriormente denominará *el regreso del experimentador*, fenómeno que menciona por primera vez en su libro *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice* (1985). En esta obra introduce, con la siguiente afirmación, lo que nosotros entenderemos como el *argumento del regreso del experimentador en la replicación* y que llamaremos *AREr*:

AREr [El regreso del experimentador] es una paradoja que se presenta a aquellos que quieren utilizar la replicación como un *test* de la verdad de una proposición científica. El problema es que, dado que la experimentación es una cuestión de habilidad práctica, nunca es claro si un segundo experimento fue lo suficientemente bien realizado como para contar como una contrastación [*check*] de los resultados del primer experimento. Un experimento posterior es requerido para evaluar la calidad del último, y así... (Collins, 1985, p.2).

Según Collins, si hemos de determinar el valor de verdad de un enunciado empírico obtenido por vía experimental, debe apelarse a la replicación.⁵⁹ Lamentablemente, a pesar de los numerosos artículos dedicados al tema, Collins no proporciona una definición del término ni tampoco una elucidación satisfactoria del concepto. Parece asumir que un experimento es la replicación de otro si los mismos son idénticos, sin indagar a qué clase de identidad se está refiriendo. Podríamos suponer, a partir de ciertas citas, que el autor se refiere a la *identidad funcional*, un concepto que, si bien Collins no utiliza, sería apto para precisar a qué forma de identidad se está refiriendo. Por ejemplo, la ausencia de identidad funcional permitiría explicar (humorada aparte) este caso:

Discutiendo los intentos de detección de altos flujos de ondas de gravedad a comienzos de 1970, un físico ilustró la situación comentando que tal vez la diferencia entre un aparato y el otro se debiera a que el primero apoyó sobre los transductores una copia del *Physical Review Letters* mientras el pegamento se secaba. (Collins, 1991, p. 135).

Si aparentemente se cumple la identidad material entre detectores, variaciones en detalles presuntamente triviales pueden provocar que el primer y el segundo detector no sean *funcionalmente idénticos*; considerando que esto se cumple cuando dos detectores

⁵⁹ La justificación que brinda Collins se expondrá en el próximo capítulo.

materialmente idénticos, al ser excitados por una misma señal (*input*), proporcionan el mismo *output*. Esta diferencia, sugiere Collins, se debería a la existencia de conocimiento tácito, esto es, conocimiento no proposicional, que desempeñando un papel importante en el funcionamiento del instrumento, no puede transferirse entre investigadores. Si bien la noción de conocimiento tácito fue acuñada por Michel Polanyi (1966), Collins, en su artículo: *Tacit Knowledge, Trust and the Q of Sapphire*, define el conocimiento tácito como:

Conocimiento o habilidades que pueden ser traspasadas entre científicos por contacto personal pero que no pueden ser, o no han sido transferidos por medio de fórmulas, diagramas o descripciones verbales así como tampoco por medio de instrucciones para actuar. (Collins, 2001, p.72).

Entonces, si los dispositivos no son *funcionalmente idénticos*, las diferencias en los resultados obtenidos en ambos experimentos pueden obedecer a diferencias en los instrumentos de detección (o en el uso de éstos), con lo que, según Collins, no sería posible dirimir, en un caso de discordancia, qué resultado experimental –si alguno- es correcto.

En una segunda aproximación al problema del establecimiento de un resultado experimental -que nos interesa especialmente en relación con la posible autonomía constitutiva- Collins ofrece lo que entiende como una formulación alternativa, pero que nosotros distinguiremos y entenderemos como la *versión general* del ARE:

AREg Cuál sea el resultado correcto depende de que efectivamente haya ondas de gravedad golpeando la Tierra en flujos detectables. Para resolver esto, debemos construir un buen detector de ondas de gravedad y echar un vistazo. ¡Pero no sabremos si hemos construido un buen detector hasta haber probado y obtenido el resultado correcto! Pero no sabemos cuál es el resultado correcto hasta...y así *ad infinitum*. (Collins, 1985, p. 85).

Parece claro que el resultado correcto de un experimento es tal que, en caso de existir el fenómeno buscado, es un resultado positivo (agréguese aquí todas las precisiones necesarias) y que, en caso de no existir, consiste en un resultado negativo (agréguese aquí también las precisiones necesarias). También parece claro que un buen

detector de dicho fenómeno será aquel que proporcione un resultado positivo si el fenómeno existe y un resultado negativo en caso contrario. Resta considerar si la determinación del *resultado correcto* se basa únicamente en el buen funcionamiento del detector. Es decir, si es correcto que *resultado experimental correcto* y *buen funcionamiento del instrumento* se determinen recíprocamente.

El autor, a partir de estos hallazgos, infiere que los recursos científicos nunca son suficientes para determinar si un resultado experimental es correcto o no lo es; por el contrario, aquello que considera decisivo y que permite superar el regreso del experimentador está directamente relacionado con factores no-epistémicos. Leemos, por ejemplo:

La existencia de altos flujos de ondas de gravedad es, hoy día, literalmente increíble. Mi punto no es que la sociología pueda revivirlos, sino que su desaparición fue un proceso social (y político). (Collins, 1981, p. 54).

Acerca del caso que presentamos en el capítulo cinco, Collins afirma que Richard Garwin y su colaborador, James Levine, lograron persuadir a la comunidad científica respecto de la inadecuación del trabajo de Weber, y que esta persuasión no fue alcanzada por medio de la aplicación de recursos epistémicos. En sus palabras:

He sugerido que todas estas tácticas de negociación son intentos por quebrar el regreso del experimentador. Deben emplearse tácticas no-científicas porque los recursos del experimento no son suficientes. (Collins, 1985, p. 143).

Collins deja entonces planteado un problema para el que pueden proponerse dos clases de soluciones: la que él adopta, es decir, aquella solución que quiebra el regreso apelando a razones de carácter externo a la práctica científica, o aquella que intentaremos defender en este trabajo, que insistirá en los diversos modos de satisfacer el criterio de intersubjetividad de la práctica científica, y que defenderá la importancia del conocimiento teórico en la interpretación de los resultados experimentales.

Como tendremos la oportunidad de profundizar en el próximo capítulo, aunque Collins parece asumir que *AREr* y *AREg* son equivalentes, entendemos que si bien en

ambos casos se pone de manifiesto un problema de carácter epistemológico, por cuanto los argumentos parecerían detenerse en nuestras limitaciones para obtener conocimiento científico y abordar el mundo físico, en *AREr* el énfasis recae en 1) el problema de la contrastación y de la justificación de los resultados experimentales, lo que se vincula entonces con la *j-autonomía* (pero, desde luego, también con qué entendemos por *resultado experimental*); y 2) el problema de la replicación de los experimentos como una forma de contrastación privilegiada (un problema que a su vez está ligado a la postulación de juicios de identidad). La formulación de *AREg*, presupone una forma de realismo –bastante ingenuo, por cierto– según el cual la ciencia nos debería ofrecer un acceso al mundo empírico tal como este mundo es. Además, dado que afirma que el único modo de determinar cuál es *el resultado correcto* de un experimento es a partir de la información que nos proporcione un instrumento que funcione adecuadamente, *AREg* se relaciona con la tesis de la autonomía constitutiva de la experimentación.

Resumiendo: ¿cuál es la relación entre *AREr*, *AREg*, *c-autonomía* y *j-autonomía*?

La respuesta que ofrezcamos a *AREg* depende de qué es lo que entendamos por resultado experimental y ello requiere que evaluemos la tesis de la *c-autonomía*. Por su parte, una respuesta de carácter externalista a *AREr* se seguiría sólo si se cumple que los experimentos no son *j-autónomos* y si la única forma admisible de reproducir un resultado experimental es replicándolo y si la replicación requiere conocimiento tácito y si el conocimiento tácito no es transferible entre equipos de investigación y si no hay un criterio independiente al buen funcionamiento de un detector para conocer cuál es el resultado correcto de un experimento.

Dicho lo anterior, estamos en condiciones de continuar con el análisis de *AREr* y *AREg*. Por ello, en el próximo capítulo nos detendremos en algunos de los resultados a los que han llegado quienes discutieron el argumento del regreso del experimentador, reconstruiremos cada uno de los argumentos y explicitaremos el vínculo entre *AREr* y *AREg*.

7.1 ¿Cuántas formas hay de *regresar*?

En el capítulo anterior señalé que el argumento del regreso del experimentador no es, como Collins nos invita a pensar, un único argumento, sino que, por el contrario, se trata de dos argumentos diferentes que, como mostraremos en este capítulo, están vinculados. Aquí, probaremos esta afirmación ofreciendo una reconstrucción de cada uno de los argumentos.

En un artículo dedicado al análisis del regreso del experimentador, Godin y Gingrass (2002) señalan que el regreso del experimentador es una reformulación del argumento escéptico respecto de la fundamentación del conocimiento que propusiera Montaigne, quien retomando el desafío de Sexto Empírico, afirmaba:

Para juzgar las apariencias que recibimos de los objetos, necesitamos instrumentos de juicio, para verificar el instrumento, necesitamos una demostración, para verificar esta demostración, un instrumento: nos encontramos en un círculo. (Montaigne, *Essays*, p. 544).

Sin embargo, e independientemente de los paralelismos que podamos trazar entre el regreso del experimentador y el argumento de Montaigne (en efecto, lo que llamamos *AREg* podría pensarse como una instanciación del argumento de Montaigne para la práctica experimental, como veremos en la próxima sección), los autores no distinguen, como nosotros, dos formas de *ARE* pasando por alto un hecho notable: las dos versiones exhiben estructuras argumentativas diferentes. En efecto, lo que denominamos *regreso en la replicación*, *AREr*, mostraría que en el establecimiento de la evidencia experimental se incurre en una *regresión al infinito*. Según *AREr*, para aceptar un

resultado experimental como evidencia empírica, éste debe ser reproducido. Esta reproducción, argumenta Collins, debe llevarse a cabo por medio de la replicación del experimento original; sin embargo, tampoco existe la certeza de que el segundo experimento sea realizado apropiadamente, de modo que se vuelve necesaria una reproducción posterior, y así sucesivamente. Por el contrario, *AREg* (tampoco el argumento de Montaigne, de hecho) no posee la misma forma argumentativa. En este caso, *AREg* afirma que para determinar, por ejemplo, si existen o no ondas de gravedad, es preciso saber si el instrumento disponible es o no es un buen detector de ondas de gravedad, pero para saber esto, tenemos que conocer previamente si las ondas existen o no existen. *AREg* tiene la forma lógica de un argumento circular de tipo *recíproco*. En esta clase de argumentos, la verdad de las premisas depende de que la conclusión sea verdadera.⁶⁰ Dado que la posibilidad de obtener conocimiento científico depende de que en algún momento se salga de este círculo, y que de hecho, esto sucede, la explicación que encuentra Collins es que es la vía externa o de la negociación aquella que permite superarlo. Si bien *AREg* pondría en cuestión una de las formas internas a la práctica científica para determinar qué cuenta como evidencia empírica: la vía puramente experimental, para Collins, esto nos conduce inmediatamente a aceptar su salida del regreso. Sin embargo, no hay razones ni empíricas ni conceptuales que nos fuercen a tomar esa salida. Aun existe otro recurso interno, la vía teórica, que es la que exploraremos y defenderemos aquí.

En general, muchos de los autores que han criticado las afirmaciones de Collins,⁶¹ particularmente aquellos que se han detenido en el análisis del argumento del regreso del experimentador, han sostenido que *AREr* y *AREg* son *formulaciones diferentes* del argumento. Por ejemplo, Hans Radder, tras haber citado ambas versiones, afirma:

Estas dos formas de poner en cuestión el poder (dis)confirmatorio de la replicación llevan a dos formulaciones diferentes del regreso del experimentador, ambas

⁶⁰ Para un estudio histórico y un análisis de los argumentos escépticos de regresión al infinito y de reciprocidad véase Barnes (1990).

⁶¹ El argumento de Collins ha recibido numerosas críticas desde diversos ángulos. Nosotros analizaremos el argumento con el fin de mostrar un *non sequitur*. Véase además de los autores ya mencionados, Culp (1995) y Hones (1990). Para una discusión respecto de la inconsistencia entre el empirismo y el relativismo en el pensamiento de Collins, véase Laudan (1982). Para una crítica del argumento desde la sociología de la ciencia, véase Knorr-Cetina (1982).

presentes en el libro de Collins, aunque no son distinguidas explícitamente. (Radder, 1992, p. 67).

En efecto, Collins no distingue entre ambos argumentos y se refiere indistintamente ya sea al problema de la replicación (que quedaría implicado por *AREr*) ya sea al problema de la determinación recíproca de la evidencia empírica (que quedaría implicado por *AREg*). Por su parte Radder, si bien destaca lo anterior, parece no advertir que no se trata sólo de formulaciones diferentes, sino de argumentos distintos –que si bien están relacionados (ya que el regreso general implica el regreso en la replicación, pero no a la inversa)- poseen estructuras lógicas diferentes. Aunque su reconstrucción sea perfectible, Radder sí advierte el amplio alcance de lo que denominamos *regreso general*. Citando el pasaje con el que introdujimos *AREg*, comenta:

Permítanme primero indicar que habría un “regreso del conocedor” análogo y que es característico de *todos* los métodos de adquisición humana de conocimiento. Dado que el único acceso a la realidad es mediante nuestros métodos de adquisición de conocimiento, las afirmaciones acerca de la realidad o de la verdad y las afirmaciones acerca de la adecuación o de la competencia de nuestros métodos son, de un modo u otro, intrínsecamente dependientes uno de otro. Hay un cierto holismo aquí, algo que en otras tradiciones ha sido descrito como un círculo hermenéutico. (Radder, 1992, p. 67, cursivas en el original).

Y continúa:

Esto implica que el regreso del experimentador no tiene una relación suficientemente específica con la experimentación. Lo que se vuelve evidente a partir de la primera formulación del regreso, que simplemente afirma que un resultado correcto presupone que se ha seguido un método correctamente. (Radder, 1992, p. 68).

Coincido con Radder en este punto pero me interesaría recordar lo siguiente. La filosofía de la ciencia hereda un conjunto de problemas que otras áreas de la filosofía intentan resolver –con éxito dispar- desde hace siglos. Problemas semánticos, problemas lógicos, problemas epistémicos, problemas metafísicos, etc. Sin pretender resolver disputas del orden del fundamento último del conocimiento, al menos podemos intentar mostrar por qué no este problema no afecta en ningún sentido profundo a la práctica experimental y, más específicamente, por qué no es correcto concluir que *AREg* se supere apelando a factores externos a la práctica científica.

7.2 La reconstrucción de *AREr*

Por razones metodológicas y expositivas, comenzaremos reconstruyendo *AREr*. En el segundo capítulo de *Changing Order*, Collins nos recuerda un principio básico para la práctica científica: el cumplimiento de la norma de intersubjetividad en el establecimiento de la evidencia empírica. En la práctica experimental, esta norma se satisface por medio de la reproducción de experimentos. El autor prosigue analizando los diversos modos de satisfacer esta condición y los problemas que se presentan al intentarlo. Los problemas derivan en lo que Collins llama el *ARE*, que para nosotros será el *AREr*. En esta sección, por lo tanto, buscaremos recuperar y precisar el conjunto de supuestos que permitirían derivar lo que llamamos *el regreso del experimentador en la replicación*. Las premisas que detectamos detectamos son las siguientes:

(1) **Tesis de la reproducibilidad:** un resultado experimental, para ser científicamente significativo, debe poder repetirse, existiendo diversos medios para ello:

- a- La repetición en el mismo arreglo experimental, esto es, realizando múltiples determinaciones con el instrumento / arreglo experimental original.
- b- La replicación del equipo original, esto es, repitiendo un experimento en copias idénticas del arreglo experimental original.

c- La contrastación independiente, es decir, utilizando instrumentos cuyo funcionamiento esté basado en principios físicos diferentes.⁶²

(2) **Tesis de la inequivalencia epistémica de las formas de reproducción experimental:** las opciones que presentamos en (1) no son equivalentes respecto del grado de confirmación o disconfirmación que proporcionan. Según Collins, la replicación aporta mayor grado de disconfirmación; mientras que un experimento basado en principios físicos independientes aporta mayor grado de confirmación en caso de proveer igual resultado. El autor ofrece el siguiente apoyo en defensa de la verdad de esta tesis:

a- Las determinaciones sucesivas obtenidas con un mismo aparato no incrementan necesariamente el grado de confirmación del resultado inicial. Dice Collins, retomando a Franklin y Howson (1984):

Para que un experimento constituya un *test* de otro anterior, no debe ser exactamente el mismo, pero tampoco muy diferente. Tómese un par de experimentos –uno que origine un nuevo resultado y un experimento subsiguiente. Si el segundo experimento es demasiado similar al primero, no agregará ninguna información confirmatoria. El caso extremo en el que cada aspecto es literalmente idéntico al primero, no es siquiera un experimento separado. En estas circunstancias, el segundo experimento no significará más que la lectura del informe experimental una segunda vez. (Collins, 1985, p.34).

Sin embargo, el autor acepta que:

En un área poco comprendida, los científicos [...] no son capaces de garantizar que los resultados serán los mismos y entonces la observación de estos resultados sí agrega confirmación. (Collins, 1985, p. 35).

⁶² En su investigación, Collins omite el caso de instrumentos del mismo tipo –de hecho el caso más usual en las ciencias empíricas- que no pueden entenderse como copias puesto que contemplan ciertas variaciones que permiten incrementar su sensibilidad respecto del original. Volveremos sobre este punto en el apéndice, esbozando criterios que nos permitirán esclarecer las expresiones “mismo tipo que” “copia” “réplica” y expresiones relacionadas con éstas.

- b- La replicación es problemática cuando se desconocen las posibles fuentes de error que pueden enmascarar o simular el fenómeno que se investiga. Dice al respecto:

En ausencia de un conjunto bien establecido de variables relevantes, cualquier cambio en la situación experimental, sin importar cuán trivial en apariencia, bien puede implicar cambios significativos, aunque invisibles, en las condiciones. (Collins, 1985, p. 35).

- c- La contrastación independiente, si bien permite confirmar un resultado, no es aplicable como medio para disconfirmarlo, dado que podrían omitirse elementos relevantes que incidieron en la detección por la vía original.

Si el segundo experimento no provee el resultado pretendido, las diferencias en el diseño entre el primero y el segundo pueden ser invocadas como la causa de la falla. (Collins, 1985, p.36).

(3) **Tesis de la elección del método de reproducción orientada a fines:** teniendo en cuenta que no toda forma de contrastación de un resultado experimental suministra el mismo grado de confirmación o disconfirmación, la pertinencia del uso de un medio de contrastación determinado debe juzgarse teniendo en cuenta el objetivo que se persigue con la contrastación. Afirma Collins:

El poder confirmatorio parece aumentar en la medida en que la diferencia entre un experimento confirmatorio y el experimento inicial aumenta. [...]. Sin embargo, esta conclusión –a mayor diferencia entre experimentos, mayor poder confirmatorio- proporciona sólo un extremo en esta *cinchada* (*tug-of-war*) epistemológica. El otro extremo se comprende considerando un caso radical. Supongamos que se obtiene un nuevo resultado, digamos en física. Imaginemos que éste fue confirmado numerosas veces por alguien con un *background* diferente, que no creía en la corrección del resultado y que utilizó un aparato experimental diferente del original tanto en lo que respecta a su concepción, su diseño y sus premisas teóricas. ¿Debe ser ésta una razón para celebrar por parte del primer experimentador? La respuesta debería ser afirmativa si la argumentación anterior

fuese la historia completa, pero supongamos que el segundo experimentador fuese un escéptico arúspice con los pies sobre la tierra.⁶³ (Collins, 1985, pp. 34-35).

(4) Se sigue de (1), (2) y (3): la disconfirmación de un resultado experimental, al menos en investigación de frontera, debe realizarse por medio de la replicación del experimento original.

La fuerza de la disconfirmación asciende en tanto el segundo experimento se aproxima a la identidad con el primero. (Collins, 1985, p. 36).

(5) **Tesis de la incidencia del conocimiento tácito y de la indetectabilidad de su transferencia:** la replicación involucra *conocimiento tácito* y no es posible ofrecer en un conjunto finito de pasos las instrucciones para obtener una réplica del diseño original.

La habilidad experimental es tal que sólo puede ser adquirida y desarrollada con la práctica. Ya que es una habilidad, no puede ser completamente elucidada o absolutamente establecida. [...]. La habilidad experimental es invisible en su transmisión y en aquellos que la poseen. (Collins, 1985, p. 73-74).

(6) **Tesis de la idoneidad del dispositivo experimental y del experimentador:** el buen funcionamiento del instrumento o arreglo experimental y el experimentador experto se determinan a partir de la habilidad en producir el resultado experimental correcto.

El funcionamiento correcto del aparato, partes del aparato y el *experimentador* son definidos por la habilidad de formar parte en la producción del resultado experimental correcto. Otros indicadores no pueden encontrarse. (Collins, 1985, p.74).

⁶³ Me tomo aquí una cierta libertad en la traducción. En el original se lee: “but suppose that the second experimenter were a sceptical fairground gypsy who had generated the confirmatory result by reading the entrails of a goat!” Entiendo que el término correcto para los adivinos que leían las entrañas de animales es *arúspices*. Creo, por varios motivos, que esta expresión es preferible.

(7) **Tesis de la determinación recíproca del buen instrumento y el resultado experimental correcto:** ésta es una tesis que Collins incorpora a partir de la comparación entre la creación de un láser (el *TEA* láser) y los intentos por detectar ondas de gravedad (el caso que estudiamos en el capítulo cinco). Según Collins, las dificultades en el armado y en la puesta en funcionamiento de las réplicas del *TEA* láser original, se solucionaron porque el criterio para decidir cuándo el láser funcionaba correctamente era obvio. Pero, insiste Collins, esto no sucede así en el resto de los experimentos (cf. Collins, 1985, p. 147).

El trabajo experimental puede utilizarse como un test si encontramos una forma de quebrar el círculo. El regreso del experimentador no se manifestó en el capítulo anterior porque en el caso del láser *TEA*, el círculo ya estaba roto. La habilidad del láser para vaporizar cemento, o lo que fuere, suponía un criterio universal de calidad experimental. Nunca existieron dudas acerca de que el láser debía ser capaz de funcionar y nunca existieron dudas acerca de cuándo estaba funcionando y cuándo no. Cuando no se dispone de un criterio tan claro, el regreso del experimentador sólo puede evitarse encontrando otra forma para determinar la calidad de un experimento; es preciso encontrar un criterio que sea independiente del *output* del experimento. (Collins, 1985, p. 84, cursivas añadidas).

En cualquier caso, si aceptásemos las premisas de Collins, no se sigue de ellas que el resultado correcto de un experimento pueda ser establecido exclusivamente por medios experimentales, como Collins parece pretender y como se volverá más evidente en la reconstrucción de *AREg*. De hecho, no encontramos en los trabajos de Collins justificación suficiente de este componente de la tesis. Volveremos sobre este punto en la próxima sección.

De las premisas que hemos expuesto, Collins extraería la siguiente conclusión:

(C) La replicación, único medio legítimo para la contrastación de un resultado experimental, no permite determinar su corrección. Y, dado que la replicación era el único medio legítimo para tal fin, la determinación del resultado correcto no puede realizarse por la vía *científica*.

Ahora bien, dado que, el regreso al infinito, en la práctica, se resuelve de algún modo, la hipótesis explicativa que defiende Collins, de cara a la conclusión que él extrae, es que el quiebre del regreso se logra a partir de la aplicación de estrategias no-científicas.

Una vez que la verdad científica se conoce, se olvida que para alcanzar la resolución del conflicto, se precisaron tácticas de negociación no-experimentales y no-científicas. (Collins, 1985, p. 152).

En apoyo de lo anterior, Collins ofrece la interpretación de su trabajo de campo en el marco de los intentos por detectar ondas de gravedad. En el capítulo 5 hemos explicado este caso, analizado todos los problemas asociados y, sin embargo, no hemos tenido que hacer referencia a ninguna táctica no-científica para mostrar por qué no fueron aceptados los resultados de Weber. ¡Ni siquiera se intentó en este episodio replicar su antena!

La reconstrucción que presentamos despeja y muestra el camino dialéctico para cuestionar las conclusiones del sociólogo. Hay varias posibilidades para proceder. En primer lugar, podríamos aceptar la existencia de un regreso al infinito en la replicación, pero negar que la conclusión a la que Collins arriba se siga de las premisas. Es decir, el argumento, tal como Collins lo entiende, con esa conclusión que él extrae, es inválido. Sin embargo, sí existe un regreso al infinito en la replicación, aunque la conclusión correcta a inferir es otra.

En segundo lugar, podríamos pensar que el argumento es válido, pero que alguna de las premisas es falsa, y que si bien la conclusión se sigue, ésta no es necesariamente verdadera.

Nuestra estrategia para contestar este argumento en particular es doble. En primer lugar, nos interesa mostrar que la conclusión que extrae Collins no es la conclusión que debe extraerse de las premisas consideradas. La conclusión correcta que puede extraerse es que si hay un regreso al infinito, entonces éste no siempre puede resolverse por medio de la replicación. En efecto, a pesar de lo que Collins pretende, lo máximo que podemos concluir, si el argumento es válido y si son verdaderas las premisas (1), (2), (3), (4), (5), (6) y (7) es que no es posible realizar una evaluación adecuada de un resultado experimental por medio de la replicación. Con ello, la regresión al infinito debería resolverse juzgando la corrección del resultado a partir de criterios *extra-*

experimentales, pero de esto no se sigue que los criterios sean extra-científicos (es decir negamos la segunda parte de la conjunción en la conclusión). Sin embargo, Collins concluye -precipitada e injustificadamente, a mi juicio- que *extra-experimental* significa *externo*, contingente, social, político, económico, etc.

Ahora bien, hasta aquí consideramos que el argumento es inválido y explicamos cuál sería la conclusión correcta del argumento. Ahora cuestionaremos la verdad de las premisas del argumento. Varias de las tesis que se presuponen para defender la ocurrencia de *AREr* son cuestionables; podríamos objetar, por ejemplo, la verdad de (3). ¿Por qué razón un equipo de investigación debería partir del supuesto de que un experimento ha sido mal realizado?⁶⁴ Especialmente frente a la ausencia de un resultado que, habiendo sido introducido teóricamente, circunscriba las posibles respuestas adecuadas del experimento (que es una de las opciones que, precisamente, Collins no quiere aceptar). Otra tesis cuestionable es, por ejemplo (5), esto es, la indetectabilidad de la transferencia del conocimiento tácito. En virtud de la estructura de este trabajo y con el propósito de evitar distraernos de nuestro objetivo principal, incluiré un apéndice en el que presentaré mis propias objeciones a la tesis (4)⁶⁵ y a la tesis (5), con ello, lo que me interesa enfatizar es que, si mostramos que la replicación no es el medio exclusivo para la confirmación de la corrección o incorrección de un resultado, en muchos casos sí existirían modos de determinar la corrección de un resultado por vía experimental, como estudiaremos en el capítulo nueve.

Finalmente, notemos ahora que la última premisa que utilizamos en la reconstrucción del regreso del experimentador en la replicación es, justamente, la tesis que da origen a la versión general del regreso del experimentador, de la cual nos ocuparemos a continuación.

7.3 La reconstrucción de *AREg*

Habíamos dicho que Collins presenta *el regreso del experimentador* ora bajo la forma de *AREr*, ora bajo la forma de *AREg*. Mostramos en la sección anterior que *AREr*

⁶⁴ Podría darse el caso, desde luego. Pero Collins debería motivar esta tesis con un argumento independiente, y no lo hace.

⁶⁵ Más arriba afirmé que (4) se sigue de (1), (2) y (3). Al discutir la verdad de (4), entonces, estoy asumiendo que alguna de las premisas es falsa, desde luego.

presupone una premisa que es, ni más ni menos, el corazón de *AREg*: la tesis de la determinación recíproca del buen instrumento y del resultado experimental correcto. Es curioso, pero Collins no parece reconocer cuánto más general es esta tesis que el propio argumento del que forma parte. Si esta tesis fuese verdadera, Collins estaría en condiciones de mostrar no sólo que la replicación es problemática, sino que cualquier forma de reproducción experimental lo es; sin embargo no advierte –o al menos no manifiesta advertir plenamente- el alcance de la tesis.

De cara a la reconstrucción de *AREg* hay un punto más que importante a señalar. A diferencia de lo que ocurrió en la reconstrucción anterior, en la que pudimos dar con las motivaciones que Collins tiene para defender cada una de las tesis o presupuestos necesarios para la ocurrencia del regreso en la replicación, en este caso, la situación es algo diferente. Sea porque Collins haya considerado que *AREg* es sólo un caso particular de *AREr*, y con ello se haya considerado eximido de ofrecer nuevas razones, o quién sabe con certeza por qué, el caso es que no hay aquí demasiada justificación (especialmente para la segunda tesis que permitiría la ocurrencia de *AREg*). Podríamos pensar que esto es bueno, que nos ahorra trabajo, pero lo cierto es que hacer una afirmación no apresurada y justa de la no-existencia de algo no es tarea sencilla. Así que sólo después de mucho releer sus textos, creo estar en lo cierto aun cuando desconozca las razones por las cuales Collins no justifica la verdad de las premisas de *AREg*.

Supongo que habrá quedado ya claro que *AREg* no puede seguirse de las meras dificultades prácticas y conceptuales que se presentan al intentar determinar si la replicación de un experimento ha sido exitosa. Supongo también que queda claro que es sólo en la medida en que no hay un resultado establecido de antemano que esto sucede. También creo que quedará claro que éste no es un problema exclusivo de la replicación como Collins sugiere (esto es especialmente evidente en la cita que elegimos para presentar *AREr*, en la que el sociólogo dice explícitamente que *ARE es una paradoja que se presenta a quienes pretenden utilizar la replicación como el test de una afirmación empírica*), sino de cualquier modo de reproducción, en la medida en que no haya un resultado establecido. Y es este problema el que *AREg* trae al foro. Sin embargo, éste no es un problema que haya descubierto Collins, ni un problema específico de la ciencia experimental. Es un problema que presenta cualquier posición fundacionalista respecto de la justificación del conocimiento empírico.

Dicho lo anterior, pasemos a la reconstrucción de *AREg*. En este caso se trataría de un argumento recíproco que puede reconstruirse como sigue:

(1) **Tesis de la idoneidad del dispositivo de detección:** ésta es una de las proposiciones puestas en conjunción que conformaban la tesis (6) en el argumento anterior. Con esta tesis se afirma que un buen detector de x es aquel que indica que x si x y que no x si no x .⁶⁶ No parece tener mucho sentido discutir esta tesis. Claramente un instrumento funciona correctamente cuando permite detectar lo que existe en la medida en que existe; o cuando permite determinar las propiedades de lo que existe en el grado con el que éstas propiedades se instancian; o cuando permite indicar si una propiedad se presenta o no en el objeto que se investiga. Lo que no parece apropiado -y esto (si mi trabajo fue bien realizado) debería haber quedado suficientemente motivado a partir de los casos de análisis que hemos presentado en la segunda parte de esta investigación- es pensar que un dispositivo experimental nos revelará la historia completa de lo que estamos determinando. Mientras que gracias a la realización material del experimento obtenemos un *output*, una serie de instancias de interpretación dotan de significado al *output* del experimento para que podamos decir: éstas son ondas de gravedad; la velocidad de la luz es 300.000 kms/s; la luz blanca es compuesta; etc. Con ello, la forma más aceptable de presentar (1) sería la siguiente: un buen detector de x es aquel que nos ofrece un elemento directamente observable a partir del cual podríamos inferir (si dispusiésemos del conjunto de supuestos teóricos adecuados y si razonásemos correctamente) que x es el caso cuando x es el caso, y que no nos permite inferir que x es el caso cuando x no es el caso. Pero, desde luego, Collins no estaría de acuerdo con presentar esta tesis en esos términos.

(2) **Tesis de la introducción experimental del resultado:** Con esta tesis se afirma que la determinación de x se realiza utilizando un buen detector de x . La única forma de conocer si es o no es el caso que x es por medio de nuestros instrumentos de

⁶⁶ Collins presenta el argumento utilizando el caso de la detección de ondas de gravedad, por lo tanto, se trata de un experimento de carácter existencial. Aquí tratamos de ofrecer una reconstrucción general que sea compatible con los distintos tipos de resultados posibles que distinguimos en el capítulo dos. Entonces, si quisiéramos aplicar *AREg* para el caso de los experimentos atributivos cuantitativos, deberíamos sustituir x por: “la magnitud de y es n ”, etc.

detección. Comprender bien el alcance de esta premisa es fundamental para nuestros propósitos ya que ésta será uno de los blancos principales de nuestra crítica. Collins –a pesar de que esta tesis es central en su argumentación- no nos ofrece razones fuertes para aceptarla. Afirma:

¿Cuál es el resultado correcto? [...] Para saberlo debemos construir un buen detector y ver. (Collins, 1985, p. 84).

Collins necesita motivar apropiadamente (2). ¿Cuáles son las razones para pensar que el único criterio que tenemos para conocer si pueden existir o no ondas de gravedad radica en el resultado de un experimento aislado? En el caso de la detección de ondas de gravedad, un caso en el que los diversos equipos de investigación obtuvieron resultados diferentes, se volvió mucho más relevante el papel que la teoría tiene al momento de guiar una investigación experimental. Si bien dado el éxito y la capacidad explicativa de la teoría general de la relatividad estamos a la expectativa de detectar ondas de gravedad; como enfatice, la intensidad de la señal que afirmaba haber detectado Weber tenía que estar acompañada por otros efectos que no se hicieron presentes. Dada entonces la existencia de explicaciones alternativas acerca de cómo resolver la reciprocidad, Collins debería haber ofrecido más evidencia de que los recursos internos no son suficientes, pero no lo hizo. *AREg* se resuelve en virtud de que existe un criterio –independiente del buen funcionamiento del instrumento o del arreglo experimental- que permite indicarnos cuál es el resultado correcto, o al menos circunscribe el espectro de resultados aceptables dado el conocimiento científico disponible. En el caso de la búsqueda de ondas de gravedad, los resultados que Weber obtuvo eran altamente improbables dado el conocimiento físico y cosmológico aceptado y, más aún, de ser correctos, deberían haber estado acompañados por eventos perceptibles a ojo desnudo que no tuvieron lugar (cf. Levine, 2002).

Hay, además, un elemento fundamental a destacar relacionado con esta tesis. Collins parece sugerir que en un experimento se detectan directamente, por ejemplo, ondas de gravedad. El *AREg* se sostiene en una mala comprensión de lo que es un resultado experimental, de cómo éste está constituido, de qué procesos intervienen en su conformación. Si puede haber una discusión sobre la capacidad de un instrumento

para producir *outputs* confiables y en correspondencia con lo que sucede en el mundo, esta discusión es muy diferente a la que consiste en determinar, dado un *output* robusto, a qué conclusiones podemos llegar a partir de su análisis e interpretación. Collins busca desdibujar estas diferencias, o simplemente trabaja desde la imprecisión. Lo que quiero destacar es que esta tesis tiene sentido sólo en la medida en que no admitamos que un resultado experimental posee un componente teórico. Si esto es así, la forma en la que Collins pretende resolver *AREg*, es decir, apelando a negociaciones que externamente indiquen cuál es el resultado correcto, no se sigue.

En este caso, podríamos pensar que la conclusión que Collins extrae es la siguiente:

(C) El buen funcionamiento del instrumento y el resultado correcto de un experimento se determinan recíprocamente.

Dado que el círculo eventualmente se elude, Collins considera que la estrategia que lo permite es externa. En efecto, luego de haber reseñado un conjunto de respuestas de los científicos que estuvieron implicados en el debate, concluye el sociólogo:⁶⁷

No hay, entonces, un conjunto de criterios “científicos” que puedan establecer la validez de los hallazgos en este campo. El regreso del experimentador lleva a los científicos a buscar otro criterio de calidad. (Collins, 1985, p. 88).

AREg, entonces, se quiebra, según Collins, apelando a criterios extra-científicos. En el próximo capítulo evaluaremos si esta conclusión está justificada.

7.4 Conclusión

En este capítulo presentamos nuestro análisis y reconstrucción de los dos *ARE*. *AREr* nos enfrentaba al problema de cómo juzgar si una replicación se ha realizado competentemente. Collins nos invitaba a adoptar la salida externalista. Nosotros

⁶⁷ Lo curioso es que la mayor parte de las explicaciones que reseña apelan a factores internos, sea teóricos, sea experimentales para dar cuenta de las razones por las cuales el círculo se quiebra.

sugerimos que es posible criticar varios de los presupuestos necesarios para formular el regreso al infinito que supone *AREr*, dos de los cuales serán tratados en el apéndice a esta tesis. En el capítulo noveno mostraremos que aún si tuviésemos que conceder todas las premisas del argumento a Collins, de ello no se seguiría que los criterios que permiten zanjar el conflicto sean externos a la práctica científica (es decir, rechazaremos que la conclusión de Collins sea la correcta a inferir de las premisas propuestas). Veremos cómo, en la medida en que los resultados experimentales no son *c-autónomos* y en la medida en que sí son *j-autónomos*, resulta posible ofrecer respuestas que quiebren el regreso en términos intra-científicos. Finalmente, *AREg* nos invitaba a hacer colapsar la determinación de la adecuación de un instrumento de detección con la determinación de un resultado correcto y la solución que proponía Collins nuevamente consistía en apelar a medios externos a los recursos científicos (desde luego ofrece la misma solución, ya que no distingue los argumentos). En nuestra reconstrucción vimos que una de las premisas centrales del argumento no estaba adecuadamente justificada, y que requería precisar qué es exactamente un resultado experimental. De ello nos ocuparemos en el próximo capítulo.

La autonomía constitutiva de la evidencia empírica

8.1 La autonomía constitutiva

Habíamos afirmado que una de las formas de precisar la vida propia del experimento estaba relacionada con la persistencia de los resultados experimentales en el contexto del cambio teórico y que ello suponía la idea de una autonomía constitutiva (en adelante, *c-autonomía*).⁶⁸ Es momento de precisar estas ideas. Comencemos presentando la tesis, que podemos formular así:

C-autonomía: Los resultados experimentales persisten en el cambio teórico. Esto es así porque éstos no dependen en sentido fuerte de las teorías que los explican.

En el ya clásico *Representing and Intervening*, Hacking (1983) afirmaba que existen dos formas en las que los experimentos dependen de las teorías: una forma débil y una forma fuerte de dependencia. En sus palabras:

La versión débil afirma sólo que debemos tener ciertas ideas acerca de la naturaleza y acerca de los aparatos antes de realizar un experimento [...] Existe, sin embargo, una versión fuerte [...] ésta afirma que el experimento es significativo sólo si se procede a contrastar una teoría acerca del fenómeno en estudio. [...] Sólo me interesa la cuestión generada por la versión fuerte: ¿debe haber una conjetura puesta a prueba para que un experimento tenga sentido? Creo que no. (Hacking, 1983, pp. 153-154).

⁶⁸ En este capítulo comenzamos pasando revista a las principales propuestas que se encuentran en la literatura sobre el tema, y utilizamos los conceptos como los introducen los autores que discutimos. Es recién en la sección 8.2 cuando ofrezco una elucidación del concepto de resultado experimental que nos permitirá un análisis más fino de la autonomía constitutiva.

Mientras que considera que la versión débil es correcta, aunque trivial, entiende que la versión fuerte es insostenible, en contraposición a la pretendida posición de Karl Popper. La *versión fuerte* quedaría capturada en afirmaciones como las siguientes:

Pero aun el experimentador no está interesado sobremanera en hacer observaciones exactas; su trabajo es, en gran medida, de tipo teórico. La teoría domina el trabajo experimental desde su planteamiento inicial hasta los retoques finales en el laboratorio. (Popper, 1959, p. 90).

Y también en parte de una nota a pie de página, en la que Popper agregaba:

Creo que debería haber enfatizado (...) la idea según la cual las observaciones, y, más aún, los enunciados observacionales y los enunciados acerca de resultados experimentales son siempre *interpretaciones* de los hechos observados; son *interpretaciones a la luz de teorías*. (Popper, 1959, p. 90, cursivas suyas).

Notemos que Hacking, quien precisamente se detiene en el primero de los fragmentos popperianos que citamos (cf. Hacking, 1983, p. 155), parece estar efectuando un desplazamiento en el sentido de las afirmaciones de Popper. El punto central que Popper discute en estas citas no es tanto la *función* del experimento, (puesto que sabemos claramente que para Popper los experimentos poseen una función exclusivamente contrastativa y coincidimos con Hacking en considerar falsa –a la par que reduccionista- dicha afirmación) sino si acaso los resultados experimentales y las observaciones en general son *teóricamente neutrales*. Popper parece -aun cuando esto pueda representar una tensión en su propio pensamiento- inclinarse por una respuesta negativa. En efecto, incorpora estas reflexiones en lo que él mismo denomina una *teoría epistémica del experimento* (cf. Popper, 1959, p. 89).

Hacking retoma este problema y ahora sí, centrándose en la neutralidad teórica de los resultados experimentales, afirma:

En una breve inspección inicial de las diferentes relaciones entre la teoría y el experimento, sería bueno empezar con los contraejemplos obvios a la idea de Popper. El experimento en el que Davy observa las burbujas de aire sobre las algas es uno. No era una “interpretación a la luz de teorías”, ya que Davy

inicialmente no tenía una teoría. Ni ver inflamarse una cerilla era una interpretación. Tal vez si él hubiera dicho “Ah, entonces es oxígeno”, habría estado haciendo una interpretación. Pero no fue eso lo que hizo. (Hacking, 1983, p. 155).

Exploremos entonces en la idea según la cual los resultados experimentales pueden ser independientes respecto de una interpretación teórica, cuando por ello se entiende que carecen de interpretación. Esto puede decirse en dos sentidos: 1) como cuestión fáctica e histórica, afirmando que es posible realizar un experimento y que sus resultados queden a la espera de una interpretación futura; una afirmación que es incompatible con la idea según la cual un resultado experimental es, simplemente, el *output* de un experimento.⁶⁹ O 2) como una afirmación conceptual, es decir, como la tesis según la cual los resultados experimentales carecen de interpretación; en este caso *resultado experimental* y *output* son sinónimos. Por ello, parece razonable concluir que para tomar posición respecto de la autonomía de la constitución es preciso comenzar por comprender claramente qué es un resultado experimental. En el experimento de Davy, por ejemplo: ¿cuál es el resultado experimental? ¿Qué es aquello que se mantendrá estable con independencia del cambio teórico? ¿Acaso la producción del evento bajo las mismas condiciones iniciales? ¿Es eso lo que entendemos por un *resultado experimental*?

Desde luego, la propuesta que Hacking parecería realizar en el pasaje citado, al mostrar que es posible realizar un experimento y describirlo en términos que no dependan de ninguna teoría (al menos, no en un sentido estricto de la expresión “teoría científica”), buscaría mostrar que es posible trazar una diferencia entre observar e interpretar, una distinción que los historicistas negaban. Afirma Hacking:

Podríamos preguntarnos si acaso la sustancia de la teoría acerca de los positrones no es una de las condiciones o presuposiciones de la verdad del tipo de expresiones que podemos representar por medio de “esto es un positrón”. Posiblemente, pero lo dudo. La teoría puede abandonarse o sustituirse por una teoría completamente diferente acerca de los positrones, pero deja intacto lo que para entonces se ha establecido como la clase de oraciones observacionales representadas por “esto es

⁶⁹ El término *output* suele utilizarse para referirse a la salida directamente perceptible de un instrumento de medición, sin embargo, aquí utilizamos el término para referirnos a cada una de las salidas directamente perceptibles de los arreglos experimentales, sean éstos productos (como en la detección de ondas de gravedad) o no (como en la detección de la refrangibilidad diferencial) de un instrumento de medición en sentido convencional.

un positrón” [...] Mi tesis es únicamente que el significado no tiene por qué estar enredado en una teoría en particular, de tal manera que cada vez que uno dice “esto es un positrón” de algún modo siempre se afirme una teoría. (1983, p. 179).

Pero ¿qué dice Hacking cuando dice “positrón”? Una respuesta posible es: el significado de positrón queda completamente recuperado por enunciados observacionales. Una segunda respuesta posible es: el significado está conformado no por una teoría en particular, sino por varias. Una tercera respuesta posible es: el significado de positrón queda parcialmente capturado por enunciados observacionales y por enunciados de carácter teórico. Una cuarta respuesta posible es: el significado de positrón es su referencia. Hacking no es claro al respecto, pero a juzgar por el capítulo 6 de *Representing and Intervening*, Hacking no es referencialista (cf. por ejemplo, p. 75 y ss). Por mi parte, me inclino a negar que la primera opción sea correcta, por las siguientes razones: el positrón es una partícula elemental introducida por el *modelo estándar de partículas*, que se concibe como la antipartícula del electrón. Si el modelo estándar se reemplazase ¿estaríamos en condiciones de decir que “esto es un positrón_{No-ModeloEstándar}” significa lo mismo que “esto es un positrón_{ModeloEstándar}”? Claro está, actualmente existen instrumentos que funcionan a partir de ciertas propiedades conocidas de los positrones. El tomógrafo por emisión de positrones (P.E.T.) es un ejemplo. Este método de diagnóstico por imágenes permite determinar la actividad metabólica de los distintos tejidos del cuerpo humano y, con ello, permite detectar actividad tumoral maligna. El método se muestra efectivo, y ello sugiere que hemos comprendido adecuadamente algunas propiedades de los positrones. Pero frente al cambio teórico, es probable que reinterpretemos y resignifiquemos –al menos en parte– las razones por las cuales el método diagnóstico resulta eficaz.

Si el análisis de los experimentos que hemos ofrecido en la primera parte de esta tesis ha sido útil, aquí podríamos replicar lo siguiente: el significado de un resultado experimental está vinculado a un conjunto amplio y variado de teorías científicas, tanto empíricas como formales, de modo que, cuando uno afirma *esto es una longitud*, *esto es un voltaje*, *esto es la velocidad de la luz*, *esto es una onda de gravedad*, etc., se están presuponiendo diversas teorías científicas, en un sentido que buscaremos precisar en este capítulo.⁷⁰

⁷⁰ Me gustaría hacer notar algo respecto de lo que no he argumentado a lo largo de esta investigación. Se trata del estatus del elemento más básico que conforma un resultado experimental: el *output*. ¿Está la percepción condicionada

Existe otra razón que abonaría a favor de la neutralidad teórica y con ello a la estabilidad de los resultados experimentales y que descansa en el tipo de supuestos teóricos que involucran los experimentos. Martin Carrier, al analizar las ideas de los representantes del *nuevo experimentalismo*, presenta lo que denominé *autonomía de la constitución* del siguiente modo:

La tercera tesis sustantiva de los nuevos experimentalistas es que los experimentos se conducen e interpretan independientemente de teorías abarcativas y sistemáticas. Por el contrario, los experimentos descansan en generalizaciones empíricas de bajo nivel acerca del fenómeno en cuestión. [...] El arreglo experimental se modela utilizando casi exclusivamente dichas generalizaciones o “hipótesis tópicas” que no son propias de ninguna teoría en particular; por el contrario, son supuestos compartidos por muchas teorías. [...]

El nuevo experimentalismo otorga especial importancia al hecho de que estas regularidades de bajo nivel acerca de las magnitudes relevantes sean más estables que las teorías sistemáticas. Dado que estas regularidades son compartidas por muchas teorías, es más difícil que sean abandonadas que las hipótesis que pertenezcan a una teoría en particular. Por esta razón, los experimentos y su interpretación, cuando es lograda a partir de regularidades fenomenológicas, tienen grandes probabilidades de ser conservados en caso de cambio teórico. [...]

Es la posibilidad de analizar los experimentos recurriendo exclusivamente a las regularidades de bajo nivel o *verdades caseras* (*home-truths*) acerca de las entidades en cuestión lo que da sustento a la afirmación de los nuevos experimentalistas respecto de la autonomía de la práctica experimental. Los experimentos poseen una vida propia; sus resultados son mucho más estables y están menos sujetos a futuras revisiones que lo que comúnmente se considera. (Carrier, 1998, pp. 179-180).

De acuerdo con Carrier, la autonomía constitutiva que, a su vez, da origen a la estabilidad de los resultados experimentales es una autonomía *relativa*, es decir, los resultados experimentales no serían independientes de *toda* teoría, sino que son independientes de teorías *abarcativas* y *sistemáticas*. Tanto el diseño de un experimento, como la interpretación de los resultados del mismo dependerían, por el

teóricamente? ¿Posee el *output* contenido conceptual o no-conceptual? ¿Debemos adoptar aquí una teoría de la percepción de rasgos humeanos o kantianos? Aquí me limito a señalarlo, pero no es objeto de nuestra investigación tratar estas cuestiones.

contrario, de *presupuestos locales* -como, por ejemplo, de ciertas propiedades fenomenológicas o causales atribuidas a las entidades que funcionarán como herramientas de investigación en un experimento- y de *supuestos transversales*, es decir, supuestos que son comunes a varias teorías, como, por ejemplo, los principios de conservación. Entonces, si bien existen presupuestos en el diseño experimental y en la interpretación de los resultados, estos presupuestos no implican la dependencia teórica respecto de ninguna teoría general (cf. Hacking, 1983, pp. 292-293). Veremos en las próximas páginas si esto es así y cómo podemos precisar la (in)dependencia teórica de los resultados experimentales.

Pero no es sólo Hacking junto con otros integrantes de la corriente analítica de la experimentación quienes defienden la idea de que los resultados experimentales pueden ser semánticamente neutrales. También Friedrich Steinle y Michael Heidelberger, representantes de la corriente continental, coinciden en este punto. Steinle distingue dos clases de experimentos: aquellos que denomina *exploratorios* y, por contraposición, aquellos que considera *guiados por teorías* (cf. Steinle, 1997, p. 65). Para él:

La experimentación exploratoria es conducida por el deseo básico de obtener regularidades empíricas y descubrir conceptos y clasificaciones por medio de los cuales esas regularidades puedan ser formuladas. Esta clase de experimentos tiene lugar especialmente en las épocas de desarrollo teórico en que –por las razones que fuere- no se dispone de una teoría bien formada o de un marco conceptual, o bien los disponibles no se consideran fiables. A pesar de su independencia respecto de teorías específicas, la actividad experimental bien puede ser sistemática y respetar las guías metodológicas habituales. (Steinle, 1997, p. 70).

Según Steinle, la función epistémica de los experimentos exploratorios es el desarrollo de marcos conceptuales y clasificatorios (cf. Steinle, 1997, p. 71). Los experimentos exploratorios permitirían la introducción de conceptos que se emplearían para organizar los datos obtenidos y desarrollar un marco teórico comprehensivo bajo el cual subsumirlos. El autor analiza experimentos tempranos sobre los fenómenos eléctricos en los que el propósito inicial consistía en descubrir ciertas regularidades empíricas, que se iban hallando conforme las condiciones iniciales de la investigación se variaban, aun sin una guía clara respecto de qué era lo esperado. Este caso parecería análogo a las investigaciones de Davy, que Hacking propone como ejemplo. Los

investigadores, en estos casos, “dan con un concepto que los habilita a expresar con coherencia un gran número de resultados en términos de una regularidad” (cf. Steinle, 2002, p. 412).

La característica más relevante de este tipo de procedimiento experimental es la variación sistemática de los parámetros experimentales. Este primer objetivo tiene como fin el de reconocer cuál de los diferentes parámetros tiene algún efecto sobre el efecto en cuestión, y cuáles son esenciales. Fuertemente relacionado con lo anterior, está el interés por formular regularidades empíricas acerca de estas relaciones de dependencia y estas correlaciones. Típicamente, tienen la forma de proposiciones condicionales, en las que tanto el antecedente como el consecuente se refieren al nivel empírico. En muchos casos, sin embargo, los intentos por formular regularidades requieren la revisión de los conceptos y las categorías pre-existentes, y la formación de nuevos, lo que permitirá una formulación estable y general de los resultados experimentales. Es aquí, en el reino de la formación de conceptos donde reside el poder y la relevancia de la experimentación exploratoria. (Steinle, 2002, p. 419).

Los experimentos exploratorios, según Steinle, son característicos de los procesos de desarrollo teórico. Los resultados experimentales, dado que no se dispone de una teoría que los explique, son teóricamente neutrales. En la próxima sección mostraremos cómo dichos experimentos también pueden ser analizados con nuestro esquema y argumentaremos que la ausencia de interpretación es sólo una contingencia histórica que no debe ser tomada como un criterio estructural.

Por su parte, Michael Heidelberger (2003) propone una distinción entre el uso de un instrumento (o de un arreglo experimental) para cumplir tres funciones diferentes: representativas, productivas o constructivas. Afirma que existen instrumentos como por ejemplo, los voltímetros y los termómetros, que representan de manera simbólica ciertas relaciones entre fenómenos naturales. Estos instrumentos transforman el tipo de información recibida en una clase de información que puede ser decodificada por el sujeto (Heidelberger, 2003, p. 147). Pero en otros casos, los instrumentos cumplen una función productiva, cuando se los utiliza para generar fenómenos que no ocurrirían espontáneamente, por ejemplo los túneles de vacío, los telescopios y los microscopios. Finalmente, un instrumento puede funcionar constructivamente cuando se lo usa para “producir un efecto en su forma pura” (2003, p. 147); como ejemplo de este último

caso, Heidelberger propone a la jarra de Leyden. Según el autor, los usos productivos y constructivos de los instrumentos son libres de teoría, mientras que el uso representativo, por el contrario, está teóricamente cargado. En los primeros casos, los instrumentos funcionan meramente en un plano causal –y Heidelberger considera que las relaciones causales deben ser distinguidas de la comprensión de las razones por las cuales causa y efecto se vinculan (cf. 2003, p. 146), y son, en este sentido, teóricamente neutrales, y, por tanto, autónomos. En el tercer caso, por el contrario, un andamiaje teórico es necesario, por ejemplo, para vincular lo fenoménico con lo simbólico por medio de la metrización de conceptos, o por medio de la postulación de generalizaciones simbólicas (Heidelberger, 2003, p. 149). El planteo general de Heidelberger es que los experimentos funcionan primariamente en un plano de relaciones causales y que sólo posteriormente sobreviene una interpretación teórica. Lo anterior lo lleva a afirmar que una buena parte de la labor experimental puede conducirse con independencia de toda teoría. En la próxima sección recuperaremos algunas de las ideas de Heidelberger y mostraremos cómo es posible precisar sus intuiciones en el marco de una semántica general para la producción del conocimiento experimental.

Tanto Hans Radder como Giora Hon, representantes de la corriente continental de los estudios sobre la experimentación, una corriente de raigambre racionalista, también realizaron aportes relevantes para el estudio de la autonomía constitutiva. Pero, en esta oportunidad, para negar la posibilidad de una experimentación libre de teoría. Reconstruiremos, a continuación, sus posiciones.

En su artículo *Technology and Theory in Experimental Science* Hans Radder (2003) afirma, contra Ian Hacking, Michael Heidelberger y Friedrich Steinle, que los experimentos libres de teorías son imposibles, negando con ello la autonomía constitutiva de la experimentación. Radder advierte que la toma de posición sobre la *c-autonomía* exige ser precisos respecto de la relación relevante entre teorías y experimentos. Para comenzar, afirma Radder, el significado de un experimento puede variar de acuerdo con el marco teórico presupuesto. En sus palabras:

El significado de un experimento puede variar como resultado de desarrollos teóricos ulteriores. En este caso, la realización material de un experimento da lugar

a conclusiones diferentes acerca del proceso experimental implicado y de los resultados teóricos. (Radder, 2003, p. 164).

Es decir, una de las formas en las que la incidencia de las teorías en los experimentos se manifiesta es en la posibilidad de una reinterpretación de un resultado experimental a la luz de una nueva teoría o de nuevos presupuestos teóricos. Y ello es posible sólo si los experimentos no son *c-autónomos*. También al respecto, afirma:

En mi análisis de los experimentos podemos distinguir dos aspectos básicos. El primero es la descripción teórica o interpretación de un experimento, representado por $p \rightarrow q$. La descripción q denota el resultado experimental (esperado). La descripción p incluye todas las premisas que son necesarias para extraer la conclusión de que q es el resultado del proceso experimental. Por ejemplo, en un experimento Stern-Gerlach q puede ser la afirmación de que el *espín* de los electrones es $\frac{1}{2}$, mientras que p incluirá las descripciones de la fuente de electrones, la dirección de la fuente de electrones, el imán y el comportamiento de los electrones en campos magnéticos no-homogéneos, y los instrumentos para la detección final de la fuente. (Radder, 1992, p. 64)

A partir de la cita anterior, me interesa señalar que Radder concibe a un resultado experimental como un constructo teórico. No es meramente el *output* del experimento. Coincidiremos en este punto. Aunque me llama la atención que sólo incorpore en p los presupuestos teóricos propios del arreglo experimental y no los presupuestos teóricos más generales que permiten afirmar que se ha medido el *espín* de un electrón.

En segundo lugar, Radder destaca la relevancia de la teoría en la ejecución y en la comprensión de lo que sucede en la *realización material* de un experimento. En otros términos, es la teoría la que nos permite comprender el funcionamiento del arreglo experimental e interpretar los *outputs* que se obtuvieron. Con el fin de ilustrar la imposibilidad de los experimentos libres de teoría en éste último sentido, Radder toma como ejemplo el experimento de Newton sobre la dispersión de la luz, que estudiamos en el capítulo cuatro y que ya había utilizado Hacking para mostrar justamente la tesis contraria, y señala:

Hacking [...] afirma que las observaciones experimentales de Newton acerca de la dispersión de la luz precedieron a cualquier interpretación teórica y, Heidelberger [...] incluye al prisma en la categoría de instrumentos productivos y libres de teoría. En lo que sigue mostraré que los experimentos de Newton dependían al menos en tres sentidos de una interpretación teórica de lo que estaba ocurriendo en la realización material del proceso experimental. (Radder, 2003, p. 166).

Radder advierte, además, y coincidimos plenamente en este punto, que en todo experimento se realizan múltiples tomas de datos, en las que éstos, en general, presentan variaciones. Comprender adecuadamente la razón de las variaciones depende de que se conozcan cuáles son las características de las propiedades medidas. Si la propiedad que se estudia es cuantitativa y continua, sabemos que con las sucesivas mediciones de ésta obtendremos resultados variables. ¿Qué implica ello? Sin una teoría que nos hable del comportamiento de la propiedad bajo estudio no podríamos determinar si la variación en la medición indica que la propiedad se instancia con valores variables o si, por el contrario, se trata de una propiedad de magnitud constante y la variación de los datos obtenidos obedece a interferencias que pueden ser desestimadas. Si se trata en cambio de una propiedad cualitativa: ¿a qué se atribuye la variación en los *outputs*? Para tomar posición respecto de lo anterior, sin duda, es necesario disponer de un marco teórico que nos provea información respecto de las características de la propiedad en estudio (cf. Radder, 2003, p. 169).

También Giora Hon parece negar la posibilidad de la *c-autonomía*, si bien no aborda de manera explícita este tema en sus trabajos. En su artículo *Frank and Hertz Versus Townsend: A Study of Two Types of Experimental Error*, Hon (1989) advierte que en todo experimento pueden distinguirse cuatro etapas: (1) el planeamiento del andamiaje teórico en el que el experimento se enmarcará; (2) la construcción del aparato o arreglo experimental y la puesta a punto para su funcionamiento; (3) la toma de datos; (4) el procesamiento de los datos y su interpretación. Asociadas a éstas, se ponen de manifiesto cuatro formas de error: (1') errores en los supuestos teóricos; (2') errores en los supuestos relacionados con el arreglo experimental y su funcionamiento; (3') errores en los informes de datos y, (4') errores en las conclusiones teóricas extraídas. (Cf. Hon, 1989, p. 103). Por consiguiente, si el experimento presupone un marco teórico para su realización y para la interpretación de los datos, es claro que Hon debería pronunciarse

en contra de la *c-autonomía* y favorecer, por el contrario, la incidencia de la teoría en la constitución de la evidencia experimental.

Hasta aquí hemos elucidado una de las formas en las que el experimento podría tener una *vida propia*: la *c-autonomía*. Hemos analizado las diversas posiciones disponibles respecto de esta tesis. Es ahora el momento de presentar nuestra propuesta acerca de la relación entre teoría y experimento.

8.2 La semántica de los resultados experimentales

En su libro *Experiment and the Making of Meaning*, David Gooding se preguntaba: “¿Cómo es que los observadores ascienden desde el mundo para hablar, pensar y argumentar acerca del mundo?” (Gooding, 1990, p. 3). Una respuesta a esta cuestión requiere que abordemos la semántica de los resultados experimentales o, en otros términos, el problema de la constitución de la evidencia experimental. La pregunta central respecto de la constitución de la evidencia empírica reside en determinar cuál es el proceso por el que un *dato crudo* se transforma en información sobre el mundo físico y, posteriormente, en evidencia a favor o en contra de una determinada teoría. Por ejemplo, cuál es el proceso que vincula un *click* en un contador de partículas con la especificación de la tasa de neutrinos solares.

Cuando se afirma que los resultados experimentales son *c-autónomos*, una de las preguntas a responder es la siguiente: ¿respecto de qué teorías y en qué sentido lo son? Veremos que es posible distinguir al menos cuatro instancias en el proceso de conformación de un resultado experimental y que en la mayor parte de ellas hay teorías presupuestas que contribuyen a la interpretación de las diferentes clases de elementos obtenidos. En la elucidación de una semántica para los resultados experimentales veremos cómo es posible diferenciar observación de interpretación y resistir el desafío de Hanson; pero, a su vez, descubriremos que la *c-autonomía*, en sentido absoluto, no puede sostenerse.

En efecto, y como hemos mostrado en los capítulos III, IV y V de esta tesis, mediante los ejemplos paradigmáticos elegidos, podríamos inferir que en todo experimento hay un conjunto amplio y variado de presupuestos teóricos, a saber: aquellos que: (i) permiten realizar un diseño experimental adecuado para los propósitos

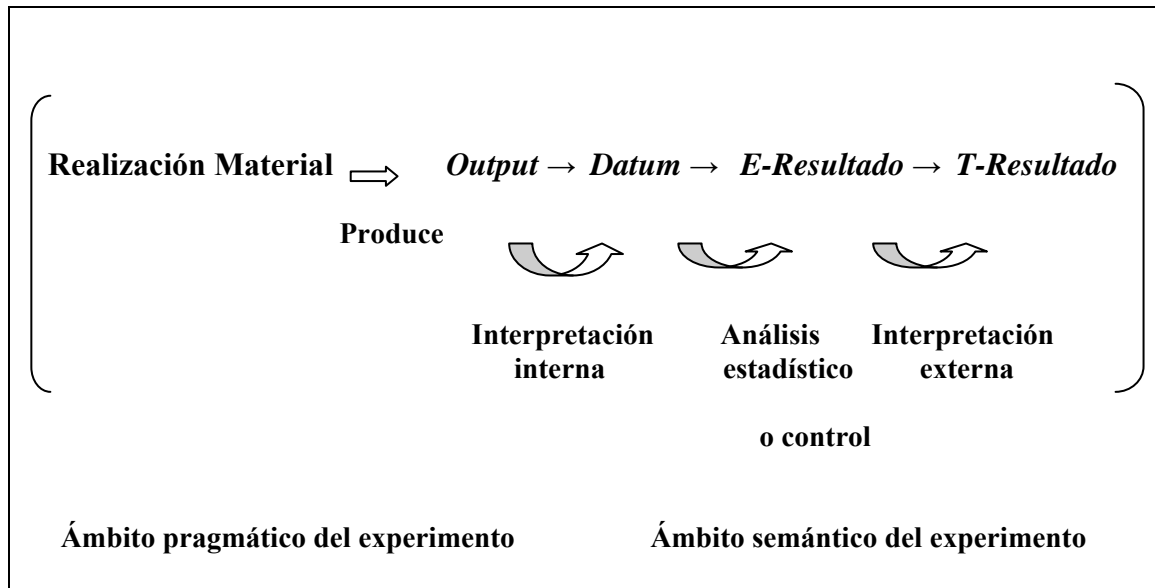
de la investigación; (ii) permiten vincular lo observado con conceptos (sean éstos clasificatorios o métricos); (iii) permiten realizar el análisis estadístico de los datos y expresar el resultado con su dispersión o estabilizar el efecto y descartar que éste sea tan sólo ruido; y que, finalmente (iv) permiten subsumir el fenómeno hallado en el experimento bajo un concepto propio de una teoría científica.

La constitución de un resultado experimental es un proceso complejo, que requiere, según lo visto en los casos de análisis, de dos momentos interpretativos: una interpretación interna al experimento y otra externa al mismo. En primer lugar, y, en parte relacionado con (ii), se requiere una atribución de significado al *output* de los instrumentos. En otros términos, el último momento de cada toma de datos de un experimento es un evento directamente perceptible, como por ejemplo, el movimiento de una aguja en un voltímetro, el sonido de un contador de partículas Geiger, una trayectoria en una cámara de niebla, dos puntos luminosos en un espejo, etc. Sin embargo, el *output* y el *resultado final* son instancias diferentes en los experimentos. Dependiendo del experimento considerado, el movimiento de la aguja en el voltímetro nos permitirá afirmar que hemos detectado ondas de gravedad, los sonidos del contador Geiger nos permitirán contar la cantidad de neutrinos presentes en un tanque y establecer cuál es el modo de producción de la energía solar, etc. La pregunta entonces es: ¿cómo es posible esta transición?

A partir de los casos estudiados, entendemos que el *output* producido en la realización material (lo que luego llamamos *ámbito pragmático* del experimento), atravesará distintos procesos de interpretación (que llamamos *ámbito semántico* del experimento), y adquirirá parte de su significado al establecer una relación con un concepto ya sea clasificatorio (como en el caso del experimento de Newton) o métrico (como en el caso de los experimentos de Michelson y Weber), por un proceso que denominaremos *interpretación interna* (en el sentido en que es *interna* al experimento). Como consecuencia de esta interpretación obtendremos *datos* que serán sometidos al análisis estadístico pertinente para el tipo de experimento (o a los controles pertinentes para el experimento considerado), obteniéndose al finalizar este proceso lo que denominaremos *e-resultado* –que es el resultado final del experimento– y, finalmente, éste será subsumido en una teoría que lo explique. A este proceso, lo denominaremos *interpretación externa* y su producto, es lo que llamaremos un *t-resultado*, es decir, un resultado experimental teóricamente interpretado. La interpretación externa puede pensarse como la inversa de la explicación. En este sentido, el *e-resultado* puede

pensarse como el *explanandum* del experimento, mientras que las teorías que permiten conformar el *t-resultado* proveen el *explanans*, nos explican por qué hemos medido lo que hemos medido o hemos observado lo que hemos observado. Por medio de estos eventos interpretativos, el *output* del experimento se integra, paulatinamente, en marcos teóricos que le otorgan, progresivamente, un sentido. Como hemos sugerido al analizar ejemplos de experimentos atributivos cuantitativos, la interpretación externa de éstos es algo diferente a la interpretación externa en el caso de los resultados de experimentos existenciales. En el caso de la medición de la velocidad de la luz, la interpretación externa no aporta nuevo contenido conceptual, todo el significado posible ya está contenido en el *e-resultado*; aunque sí es preciso que el *e-resultado*, en la medida en que se considera correcto, sea compatible con las teorías aceptadas acerca de la naturaleza de la luz. En el caso de los experimentos atributivos cualitativos, en algunos casos ésta se asemeja más a la interpretación externa de un experimento atributivo cuantitativo y en otros casos es más similar a la interpretación externa propia de los experimentos existenciales. Por ejemplo, en el caso del experimento acerca de la composición de la luz blanca, no parece que haya una diferencia sustantiva entre *e-resultado* y *t-resultado*. Ofrecer una interpretación externa, en este caso, consistiría en acomodar la idea según la cual los rayos de color que componen la luz blanca poseen ángulos distintos y específicos de refracción en el marco de una teoría que se ocupe de la naturaleza de la luz, en este caso, una teoría, como anticipamos, no-modificacionista. Sin embargo, existen otros experimentos atributivos-cualitativos en los que sí puede hablarse de una interpretación externa que explica el *e-resultado*. Por ejemplo, en el caso de la determinación de la oscilación de los neutrinos solares en el experimento SuperKamiokande.

El siguiente diagrama resume lo que hemos dicho:



Esquema 3. Modelo semántico para los resultados experimentales

Veamos ahora cómo se instancia este esquema en los experimentos considerados:

En la determinación de la velocidad de la luz que efectúa Michelson, el *output* consiste en dos puntos luminosos. Algunas de las teorías empleadas en la *interpretación interna* son las siguientes: trigonometría y cinemática. El *dato* es la distancia entre los puntos luminosos expresada en términos de la longitud de un segmento cuyos límites son los puntos luminosos, los que se introducen en la ecuación para el cálculo de la velocidad. El análisis estadístico se realiza calculando la media de todas las velocidades calculadas y el *e-resultado* es la media de todas las velocidades. El *e-resultado* adquiere una *interpretación externa* cuando se subsume esta constante en la red teórica de una teoría acerca de la luz que sea compatible con su propagación no infinita y con su invariabilidad. Es importante aquí no confundir la constitución del resultado experimental con el uso del resultado en el marco de otras teorías. En este caso, la teoría que provee la *interpretación externa* es una teoría acerca de la naturaleza de la luz; una teoría tal no requiere, necesariamente, definir cuál es el valor con el que la luz se propaga. En este caso, la teoría que buscamos simplemente debe ser compatible con el hallazgo experimental de la velocidad no nula de la luz. (Que la luz se propague a una velocidad de 300.000 Km/s es, probablemente, un hecho último que no encontrará explicación alguna). A su vez, habrá numerosas teorías que utilizarán este parámetro,

como, por ejemplo, la teoría especial de la relatividad, de la cual el resultado experimental es claramente independiente.

En el experimento newtoniano acerca de la composición de la luz blanca, el *output* es más complejo, ya que se trata, en esta oportunidad, no de una, sino de dos imágenes: el espectro oblongo y coloreado en el primer panel, las imágenes monocromáticas en el tercer panel y las posiciones de dichas imágenes. Algunas de las teorías presupuestas en la *interpretación interna* son las siguientes: la óptica geométrica y asociada a ésta, la trigonometría. En el marco de la óptica geométrica la *interpretación interna* se beneficia en especial del uso de la ley de Snell y de la idea según la cual los rayos físicos se comportan tal como los describe la óptica geométrica; también se presupone la teoría de la radiación a través de aberturas pequeñas. El *dato* consiste en la diferencia de formas entre las dos imágenes y las diferentes distancias que poseen respecto de lo que sucedería de no mediar el prisma en el arreglo experimental. En este caso, por tratarse de un experimento que no involucra conceptos métricos, no se efectúa un análisis estadístico, sino un proceso de control para evaluar si el *output* es estable (recuérdese el segundo experimento descrito en el capítulo cuatro). El *e-resultado* consiste en el ángulo de desviación específico de cada haz según su color. Éste adquiere una interpretación externa cuando se lo subsume en una teoría no-modificacionista de la luz.

Por último, en el experimento de Weber, el *output* consiste en los registros en papel continuo. Algunas de las teorías presupuestas en la *interpretación interna* son: la mecánica newtoniana, en especial la caracterización del comportamiento de un oscilador armónico. También se presupone una teoría del electromagnetismo. Los *datos* son, en este caso, los diferentes voltajes medidos. El análisis estadístico se realiza fijando un umbral, descartando los picos por debajo del umbral y determinando la significación estadística de los picos por sobre el umbral. En la *interpretación externa* se subsume el exceso de señales (que es, en este caso, el *e-resultado* del experimento) en términos de la teoría general de la relatividad, interpretándolo como la detección de ondas de gravedad, que es el *t-resultado* de este experimento. Sin embargo, en este caso, se cuestiona la legitimidad de este último paso interpretativo, indicando que si bien la teoría general de la relatividad prevé la existencia de ondas de gravedad, la detección de altos flujos de ondas de gravedad se produciría asociado a condiciones observables que no se produjeron. Eso fuerza a los investigadores a ofrecer otra explicación del *e-resultado* obtenido. En este caso se apela a los diferentes errores que cometiera Weber y que detallamos en el capítulo cinco.

Tras comparar los resultados de los experimentos cuantitativos, cualitativos y existenciales, surge una pregunta que parece bien motivada: ¿Existe en rigor un *t-resultado* para los experimentos atributivos? ¿Existe una *interpretación externa* en el mismo sentido en el que la hay para, por ejemplo, un experimento existencial? Al determinar el valor de un parámetro, ¿queda este valor explicado por alguna teoría científica? En el caso que estudiamos, la *interpretación externa* más bien parece provenir del hecho de que la medición adquiere sentido sólo en el marco de teorías que consideran que la luz posee velocidad, es decir, en la medida en que el resultado es compatible con al menos una teoría acerca de la naturaleza de la luz según la cual la luz posee una determinada propiedad; en este sentido, los experimentos atributivos cuantitativos heredan la interpretación externa del concepto clasificatorio correspondiente. Pero ello es diferente a contar con una teoría que explique por qué la luz se propaga con la velocidad que lo hace. Esto parece, como mencionamos más arriba, ser un hecho último de la naturaleza, para el que no hay explicación, de igual modo que no lo habrá para el valor de la unidad de carga mínima, o para la masa de un protón.

Teniendo en cuenta nuestra propuesta, y los casos que estudiamos en los capítulos anteriores cuyos resultados se encuentran bien representados por la semántica sugerida, parece claro que los casos que tanto Hacking como Heidelberger y Steinle presentaron como ejemplos de experimentos libres de teorías no son tales. Como mucho, son experiencias a la espera de una *interpretación externa*. Con lo cual la *c-autonomía* sería –en un sentido global-⁷¹ sólo una contingencia histórica, pero no una necesidad conceptual o un rasgo intrínseco de la práctica experimental.

Por otra parte, la semántica presentada parece ajustarse mucho más a las ideas de Radder y Hon. La distinción entre un ámbito pragmático y un ámbito semántico recupera la distinción de Radder entre la realización material y la interpretación teórica; mientras que los distintos momentos de interpretación teórica en la producción de un *t-resultado* se correlacionan con los *ídolos del teatro* que propone Hon (cf. 2003).

⁷¹ Esta precisión es fundamental. Si el lector me ha seguido detenidamente hasta este punto –y si yo he sido lo suficientemente clara– debería quedar de manifiesto que en cada instancia de conformación de un resultado experimental se presupone alguna teoría, pero al mismo tiempo, el constructo (sea el *output*, el *dato* o el *e-resultado*) es independiente de otras, que se presupondrán en una etapa posterior de interpretación.

8.3 ¿Son los resultados experimentales estables o reinterpretables?

Habíamos afirmado que la *c-autonomía* era principalmente una consecuencia de la idea según la cual los resultados experimentales se concebían como estables en el contexto del cambio teórico ya que esto implicaba que no estaban teóricamente cargados. Sin embargo, en el transcurso de nuestra investigación hemos notado que hay diversos niveles de teoría implicados en la producción de un resultado experimental. Como consecuencia de ello, nos vemos obligados a rechazar la idea según la cual se afirma la estabilidad de los diferentes tipos de resultados (con excepción del *output* que sí es estable y que se pondrá en cuestión no por razones teóricas, sino por errores en el desarrollo del experimento) y a aceptar su revisabilidad conforme las teorías que subyacen a la interpretación varíen. Con ese fin, presentaremos ahora un esquema heurístico que ofrezca los lineamientos para analizar el cambio de los resultados experimentales en el caso en que se produzca una sustitución teórica. ¿Qué es aquello que se preservará del significado de un resultado experimental en un proceso de cambio teórico? Recordemos las distinciones trazadas hasta el momento. Al analizar el proceso de constitución de la evidencia empírica tomamos en cuenta los *outputs* del experimento, los consideramos algo diferente tanto de los *datos*, como de los *resultados*. Señalamos que la producción de un *dato* depende de un proceso de conceptualización por medio del cual el *output* se transforma en un valor para una cierta magnitud o en una instancia de un concepto clasificatorio. Indicamos también que la obtención del *e-resultado* depende de la pertinencia del análisis estadístico o del control elegido, y, desde luego, de que el mismo haya sido competentemente realizado. Finalmente, indicamos que el *t-resultado*, cuando por ello se entiende que un experimento ha determinado por ejemplo, la velocidad de la luz, depende de que el *e-resultado* pueda ser subsumido en una teoría que lo explique.

Dicho lo anterior, ¿en qué casos deberíamos esperar una modificación o revisión ya sea del *output*, del significado de los *datos* obtenidos, del *e-resultado* o del *t-resultado*? Para responder esto es necesario realizar algunas precisiones más. Si admitimos que en una teoría empírica no todos sus componentes tienen la misma relevancia, y asumimos por lo tanto una estratificación intrateórica de carácter kuhniano o lakatosiano, o también afín al estructuralismo, notaremos que una teoría puede sufrir modificaciones de diferente naturaleza. Si el *núcleo duro* o si las *leyes fundamentales* de la teoría se

modifican, estaremos en presencia de un cambio interteórico, si, por el contrario, es el *cinturón protector* de hipótesis auxiliares o alguna de las *especializaciones* de la teoría la que varía, estaremos en presencia de un cambio de carácter intrateórico. Además, sabemos que las teorías no son entidades aisladas y que, en general, no introducen todos los conceptos que utilizan, sino que algunos los toman de otras teorías, estableciéndose entre ellas *vínculos interteóricos*. Teniendo en cuenta estas distinciones estamos en condiciones de enumerar los tipos de cambio teórico que serían relevantes en el contexto de la experimentación:

- 1- Cambio intrateórico en alguna de las teorías presupuestas en la conformación del *dato*.
- 2- Cambio intrateórico en alguna de las teorías presupuestas en la conformación del *e-resultado*.
- 3- Cambio intrateórico en alguna de las teorías presupuestas en la conformación del *t-resultado*.
- 4- Cambio interteórico de alguna de las teorías presupuestas en el experimento para la conformación del *dato*.
- 5- Cambio interteórico de alguna de las teorías presupuestas en el experimento para la conformación del *e-resultado*.
- 6- Cambio interteórico de alguna de las teorías presupuestas en el experimento para la conformación del *t-resultado*.
- 7- Modificación de otras teorías que se relacionan por medio de vínculos interteóricos con las teorías supuestas en alguna de las instancias interpretativas.
- 8- Modificación de otras teorías que se relacionan por medio de vínculos interteóricos con la teoría que explica el experimento.

Parece evidente que no toda modificación en las teorías presupuestas *conmoverá* de igual manera el contenido conceptual de un resultado experimental, siendo los más drásticos los cambios interteóricos y, entre éstos, aquellos que inciden en la *interpretación externa*, es decir, que implican un cambio de significado del *t-resultado*, es decir, los casos 3 y 6; entre estos, nuevamente, el caso de cambio de significado más

dramático es el que resulta de un cambio interteórico en la teoría que permite el paso del *e-resultado* al *t-resultado*, es decir la teoría explicativa. En general, en la historia de la ciencia, excepto en los casos de cambio revolucionario, las partes más básicas del resultado experimental exhiben una gran estabilidad, es decir, *outputs*, *datos* y *e-resultado*. Obviamente, el componente más propenso al cambio es el *t-resultado*, que es más inestable.

Hemos intentado en estas páginas analizar una de las afirmaciones más caras a los filósofos del experimento y, a su vez, para poder lograrlo, hemos debido refinar nuestro propio análisis de la producción de los resultados en un experimento. Hemos propuesto, entonces, una distinción entre los diversos productos de los experimentos y los hemos vinculado con aquellas teorías o supuestos teóricos de los que dependen. Con ello, hemos sugerido en qué sentido y con qué limitaciones resulta sostenible la idea de que los *outputs*, *datos*, *e-resultados* y *t-resultados* pueden considerarse autónomos o no respecto de ciertas teorías. Precisar este último aspecto, nos permitió a su vez, sugerir en qué casos deberemos esperar una modificación en el conocimiento experimental.

8.4 AREg y *c-autonomía*

Dijimos que una de las motivaciones de los *nuevos experimentalistas* para defender la idea de la *c-autonomía* estaba ligada a superar el problema de la carga teórica de la observación. Nuestra semántica permite, sin aceptar la *c-autonomía*, establecer una distinción entre observación e interpretación bloqueando entonces las consecuencias problemáticas de la tesis de la carga teórica. Más aún, si bien mostramos que todo resultado experimental depende de un conjunto de teorías para adquirir significado, cada uno de los elementos constitutivos del *t-resultado* es independiente de las teorías que se requieren en los pasos interpretativos posteriores a su conformación.

La *c-autonomía* era la tesis presupuesta detrás de la afirmación de la estabilidad de los resultados experimentales. En efecto, una de las formas de desambiguar la vida propia del experimento consistía en la afirmación de que éste no es afectado por el cambio teórico. Si se defiende lo anterior, se puede estar comprometido o bien con la

idea según la cual un resultado experimental es el *output* de un experimento, o bien con la idea según la cual los resultados experimentales poseen un significado dado por regularidades de bajo nivel, como sugiere Carrier, en su interpretación de la posición de los nuevos experimentalistas. Como hemos visto, ellos no han sido lo suficientemente claros al respecto. En nuestra tesis hemos defendido que un resultado experimental es una entidad compleja, que es mucho más que el *output* de un experimento; que está conformado por distintos elementos que poseen distinta carga teórica y que, por lo tanto, manifestarán una estabilidad diferencial. El *t-resultado* es la versión más compleja y acabada de un resultado experimental en el que una teoría sistemática y de gran alcance (al menos una teoría de tales características) explica el *e-resultado* y, en este acto, lo dota de contenido conceptual.

Ahora bien, ¿Cuál es la relevancia de lo anterior de cara a ofrecer respuestas al *AREg*? La segunda premisa del argumento recíproco afirmaba que para conocer cuál era el resultado correcto sólo contábamos con la información que nos podía suministrar un buen instrumento de detección o medición. Sin embargo, y en la medida en que un resultado experimental no es meramente el *output* de un instrumento, sino que posee contenido teórico, la evaluación de su corrección no puede depender exclusivamente de la evaluación de la corrección del funcionamiento del instrumento o arreglo experimental involucrado, sino del ajuste entre nuestras expectativas teóricas, el conocimiento disponible aceptado y el *e-resultado* del experimento. Y aun cuando el juicio respecto de cuál sea el resultado correcto de un experimento no se determine (al menos no exclusivamente) por vía experimental, ello no implica que éste se establezca apelando a factores externos, sino que se acude a la vía teórica. Seguimos a Kuhn, cuando afirma:

En los casos en que la medición es insegura, una de las pruebas de confiabilidad de los instrumentos existentes y de las técnicas de manipulación ha de consistir, inevitablemente, en su capacidad para dar resultados que concuerden favorablemente con la teoría existente. En algunas partes de la ciencia natural, sólo de esta manera puede juzgarse la adecuación de la técnica experimental. (Kuhn, 1977, p. 209).

La determinación del resultado correcto -especialmente en casos problemáticos- puede establecerse a partir de las teorías mejor confirmadas en la disciplina en cuestión y entonces, aceptaremos que el arreglo experimental funciona correctamente si es capaz de proveer resultados que coincidan con las expectativas teóricas necesarias para proporcionar una *interpretación externa* del *e-resultado* obtenido, que sea compatible con el conocimiento aceptado en el momento de la investigación.

La autonomía respecto de la justificación de la evidencia empírica

9.1 La *j*-autonomía y la epistemología del experimento

La autonomía acerca de la justificación fue defendida en los primeros trabajos de casi todos los experimentalistas, como Hacking (1983) Franklin (1986 y 1989) y Giere (1988), aunque ninguno de ellos la denominó con el nombre que aquí le damos, ni le dio una formulación precisa. Deborah Mayo (1996, p. 62) la enunció explícitamente en los siguientes términos:

J-autonomía: Los experimentos poseen una vida propia ya que la confiabilidad de sus resultados puede determinarse a partir de procesos y argumentos cuya fiabilidad se determina independientemente.

La forma de mostrar que la *j-autonomía* se satisface en la práctica científica es a partir la enumeración de diversas estrategias epistemológicas que se implementan en el transcurso de un experimento para determinar la calidad de los resultados obtenidos. Por lo tanto, un estudio de la *j-autonomía* nos lleva a estudiar lo que en la literatura se conoce bajo el nombre de *epistemología del experimento* (cf. Franklin, 1986). Veremos, valiéndonos de la semántica de resultados experimentales que propusimos en el capítulo anterior, en qué sentido los resultados experimentales pueden ser *j-autónomos*.

Antes de comenzar con la reconstrucción y el análisis crítico de la epistemología del experimento, me gustaría insistir una vez más en la insuficiente caracterización del concepto de *resultado experimental* en la literatura. Especialmente en el ámbito de la filosofía del experimento, el concepto de resultado experimental se utiliza, lamentablemente, de un modo muy impreciso, algo que intenté subsanar tanto al ofrecer el análisis de casos que conforman la primera parte de esta tesis, como -en un sentido general y abstracto- en el capítulo ocho. Los *nuevos experimentalistas* no realizan la distinción que propuse entre *output*, *dato*, *E-resultado* y *T-resultado*. En los estudios de grano más fino, cuanto mucho, se distingue entre *dato crudo* y *resultado*

experimental, entendiendo por el primero cada *output* producido en cada corrida experimental (*experimental run*) y al *resultado experimental* como el valor obtenido luego del tratamiento estadístico (cf. Mayo, 1996). La ausencia de una caracterización apropiada de este concepto central genera gran confusión en el debate. Los *nuevos experimentalistas* parecen defender que la *epistemología del experimento* permite justificar la corrección de un resultado experimental sin apelar a las teorías que introducen los conceptos para los que se intenta hallar una referencia por medio de un experimento. En algún sentido esto es correcto, pero veremos hasta qué punto es posible.

Según mi lectura del estado actual del debate y utilizando los conceptos que introduje, la idea central que motiva la *j-autonomía* es que existen modos de determinar la corrección del *output*, de los *datos*, del *e-resultado* y del *t-resultado* de un experimento, modos que no presuponen la verdad de la teoría que predice el *t-resultado* asociado. La *j-autonomía* quedaría reivindicada en la práctica del experimentador quien pone en juego una serie de criterios epistémicos, pero *teórico-independientes* (y aquí teórico-independientes debe leerse, a nuestro juicio, como independientes de la/s teoría/s que permite/n la producción del *output* o constituir el *dato* o el *e-resultado*) para realizar la distinción entre señal y ruido; entre artefacto y efecto genuino; entre apariencia y realidad; entre error y acierto.

Según Allan Franklin, existen dos razones por las cuales un *output* puede ser meramente un artefacto: sea por el mal funcionamiento de alguno de los instrumentos utilizados, o por el mismo diseño experimental. El *e-resultado*, por su parte, cuando se trata de la determinación de un concepto cuantitativo, puede ser un artefacto en virtud de la aplicación de un tratamiento estadístico inadecuado. Allan Franklin (1986, 1989, 2002a, 2002b), denominó a la tarea de mostrar cómo los resultados de un experimento son robustos o válidos como el desarrollo de una *epistemología del experimento*. Para ello, expuso en sus obras una serie de estrategias que, utilizadas habitualmente en la práctica científica, permitirían incrementar la confianza en los resultados obtenidos. Deborah Mayo, en *Error and the Growth of Experimental Knowledge* (Mayo, 1996) se dedica también al problema, distinguiéndose ambos por las diferentes líneas teóricas que sostienen. Mientras Franklin adhiere a una interpretación bayesiana de la estadística, Mayo sugiere que si hemos de ser descriptivistas, entonces la metodología a utilizar debe coincidir con las técnicas empleadas en la ciencia, esto es: la estadística clásica. Según Mayo:

Las propias narraciones experimentales están repletas de aplicaciones de los métodos estadísticos estándar, métodos desarrollados por Fisher, Neyman y Pearson, entre otros. A pesar del declarado compromiso con las prácticas efectivas de la ciencia, no hay, sin embargo, intento alguno de explicar estas prácticas estadísticas en los propios términos de los científicos. Irónicamente, donde hay un intento de aplicar métodos estadísticos para erigir una epistemología del experimento, los nuevos experimentalistas vuelven a las filosofías de la decisión y la inferencia, dominadas por la teoría. Un buen ejemplo es la apelación de Allan Franklin a la vía bayesiana al intentar constituir una filosofía del experimento. (Mayo, 1996, p. 68).

De modo que en el caso de Franklin, la estrategia propuesta consiste en proveer criterios que tengan como consecuencia un incremento en el grado de creencia en tales *outputs*, mientras que para Mayo, la modalidad a seguir consiste en evaluar los modos por los que el *background* de error puede ser minimizado. Si bien ambas posiciones comparten el objetivo final de la aplicación de las estrategias, los diferencia la vía preferida para lograr tal objetivo.

Es al reseñar el libro de Ian Hacking, *Representing and Intervening*, que Allan Franklin acuña la expresión *epistemología del experimento* (Franklin, 1984). Pero es en su libro *The Neglect of Experiment*, donde desarrolla con mayor profundidad este concepto. Llamamos entonces, *epistemología del experimento*, al conjunto de estrategias que proveen justificación para la creencia racional en la corrección de los *outputs*, *datos*, *e-resultados* y *t-resultados*. Afirma Franklin:

Aun cuando todos los científicos y filósofos de la ciencia acordaron en que la ciencia se basa en la observación y el experimento, es mínima la atención que se le ha dado a la pregunta respecto de cómo creemos racionalmente en un resultado experimental, o, en otras palabras, al problema de la epistemología del experimento. ¿Cómo distinguimos entre un resultado obtenido cuando un aparato mide u observa una magnitud y un resultado que es un artefacto creado por el aparato? [...] sugiero que hay numerosas estrategias que proveen justificación para la creencia racional en un resultado experimental y que, de hecho, son utilizadas por los mismos científicos. (Franklin, 1986, 165).

Los criterios que Franklin ofrece como parte de la epistemología del experimento son nueve: intervención y confirmación independiente, ambos propuestos ya por Hacking en *Representing and Intervening*, el chequeo experimental y la calibración, la reproducción de artefactos cuando se predice su presencia, la eliminación de fuentes de error y de explicaciones alternativas, el uso de los resultados para argumentar en favor de su validez, el uso de teorías corroboradas independientemente para explicar los resultados, el uso de instrumentos cuyo funcionamiento se sustenta en una teoría bien corroborada y finalmente, el uso de argumentos estadísticos. En este trabajo, hemos intervenido de manera sustantiva en la epistemología del experimento, distinguiendo los criterios según éstos se empleasen en la determinación de la corrección de los *outputs*, de los *datos*, de los *e-resultados* y de los *t-resultados*, y correlacionando con ello la semántica que propusimos en el capítulo anterior con la *epistemología del experimento* y ofreciendo, con ello, una clasificación que permite ordenar las diversas estrategias según su ámbito de aplicación, buscando así superar las objeciones de Giora Hon quien considera que la epistemología del experimento no puede ser meramente un listado de estrategias eclécticas y *ad-hoc* sino que deben encontrarse criterios que las organicen (cf. Hon, 2003, p. 180). Además hemos intentado ofrecer un análisis filosófico más cuidadoso que el de Franklin, lo que nos condujo a distinguir como estrategias separadas, tácticas que Franklin consideraba únicas. Con ello, nuestra presentación de la epistemología del experimento cuenta con catorce estrategias que permitirían ofrecer razones de la corrección de los diferentes elementos constitutivos de un resultado experimental.

9.2 Evaluación de los *outputs* obtenidos

Consideraremos que una estrategia epistemológica se aplica al *output* de un experimento cuando ésta tenga como objetivo evaluar la corrección o la plausibilidad de la producción del evento perceptible del experimento (la imagen formada, el sonido producido, etc.).

Intervención

Una estrategia ampliamente utilizada en la práctica científica consiste en actuar sobre el fenómeno en estudio. Aplicable fundamentalmente a la observación mediada por microscopios luminosos, la intervención permite incrementar el grado de confianza en lo que observamos por medio de estos instrumentos al comprobar las consecuencias que nuestra operación genera y al corroborar la predicción de los efectos de nuestra acción sobre el objeto en estudio. Ahora bien, teniendo en cuenta que intervenir es siempre “intervenir en X con Y ” es preciso indicar en cuál de las variables recae el énfasis, cuando nos referimos a la intervención como una estrategia de discriminación entre efectos genuinos y artefactos. En un primer sentido, intervenir significa que en el transcurso de la experimentación, el científico modifica deliberadamente el fenómeno o entidad en estudio. El énfasis recae en “intervenir en X ”. Intervenir significa entonces, modificar el objetivo (*target*) mediante la interacción física. Un ejemplo al respecto, que proporciona Hacking (1983, p. 189-190), consiste en la inyección de líquidos en una célula con una herramienta construida bajo el mismo microscopio. Aprender cómo el líquido coloreado se distribuye en la célula, presenciar la rotura de sus paredes si el volumen inyectado es superior a la capacidad de la misma, es observar lo esperado, y esto nos permite aceptar que la imagen de la célula no es un artefacto. Por medio de procesos controlados, se evalúa tanto el funcionamiento del instrumento como la objetividad de lo observado.

Otro sentido diferente que adquiere el concepto de intervención remite al uso de cierta entidad para propósitos ulteriores, como es el caso de un haz de protones utilizado para investigar la estructura del núcleo atómico. En este caso, intervenir significa “intervenir con Y ”. La noción de intervención en este sentido, nos remite a la utilización de un *material* con un fin ulterior. Ronald Giere denominó a aquellas entidades que no son objeto de la investigación sino medios para la indagación “herramientas de investigación” (*research tools*) (Cf. Giere, 1988, p.127). Para nuestros propósitos, el criterio epistemológico relevante es el primero. El segundo caso, si bien puede pensarse como una condición suficiente para la existencia de una entidad, no tiene una relación directa con la distinción entre artefactos y efectos genuinos, básicamente porque la posibilidad de utilizar una entidad con propósitos ulteriores presupone su existencia, al menos en aquellas situaciones experimentales en las que funciona como herramienta de investigación.

Validación indirecta

En ciertos casos, un fenómeno o entidad, puede observarse con un sólo tipo de instrumento. El problema reside entonces, en cómo validar aquellas observaciones que no pueden ser confirmadas independientemente. Franklin propone para estos casos la validación indirecta, que puede entenderse del siguiente modo: dada una entidad *A* que puede observarse con un instrumento *I* (ie. un microscopio electrónico) la observación es válida -lo observado no es un artefacto producido por el instrumento- si una entidad *B*, similar a *A* respecto de propiedades relevantes, puede ser observada tanto con *I* como con *I'*, siendo *I'* un instrumento cuyo funcionamiento está basado en procesos físicos distintos, obteniéndose con ambas observaciones semejantes de la entidad *B*. En estos casos, la confirmación independiente de *B* permite incrementar la confianza en el funcionamiento correcto de *I*, lo que a su vez hace plausible la validez de la observación de *A*. Dice Franklin:

Supongamos que realizamos una observación que puede realizarse utilizando una única clase de instrumentos. Supongamos también que este aparato puede producir observaciones similares que pueden ser corroboradas por medio de técnicas diferentes. La coincidencia entre las diferentes técnicas incrementa el grado de confianza en las observaciones así como también en la capacidad del primer instrumento para producir observaciones válidas. (Franklin, 1989, p. 439).

Franklin sugiere la validación indirecta como una estrategia para dar apoyo a observaciones que no pueden ser contrastadas independientemente. Para ilustrar cómo funcionaría la validación indirecta, Franklin sugiere que evaluemos el caso del enrejado microtrabecular. El enrejado microtrabecular está presente en células eucariontes y puede observarse únicamente con el microscopio electrónico. Dado que la observación no puede ser confirmada por medios alternativos, podríamos dudar de su validez. Sin embargo, existen otros componentes celulares que sí son observados tanto por este medio como mediante otros instrumentos que están basados en procesos físicos diferentes. Tal es el caso de los microtúbulos, que pueden ser observados tanto con un microscopio óptico como con un microscopio electrónico. Al confirmar independientemente la presencia de microtúbulos en una célula apelando a diferentes técnicas de observación, estamos confirmando la capacidad del instrumento para

detectar entidades con ciertas características e, indirectamente validando la corrección de la observación del enrejado. En resumen, la atención está concentrada en este caso en mostrar que el instrumento funciona correctamente, que proporciona información confiable de una cierta entidad que no puede observarse por otro medio, y para ello se apela a entidades cuyos rasgos preponderantes sí son observados por medio de diferentes técnicas. La estrategia, entonces, puede reformularse como una forma de confirmación independiente más extrapolación de resultados si hay coincidencia de propiedades relevantes. Si los resultados provistos en la confirmación independiente concuerdan, entonces tenemos buenas razones para considerar que el instrumento utilizado funciona correctamente para entidades similares, y, por ello, que lo observado por este medio es válido.

Uso de aparatos cuyo funcionamiento esté basado en teorías bien corroboradas

El requisito anterior si bien permite validar ciertos casos de observaciones, deja abierto el problema de la objetividad de lo observado en muchas áreas de investigación. Ninguna de las estrategias hasta ahora desarrolladas permite afirmar, por ejemplo, que la imagen de un conjunto de mitocondrias en una muestra no es producto de una falla del instrumento, dado que no es posible detectarlas más que con microscopios electrónicos -no es entonces posible la confirmación independiente- y, además, ninguna organela de su mismo tamaño puede ser observada con otro tipo de microscopios, por lo tanto, tampoco habrá validación indirecta. Acerca de este criterio, Allan Franklin indica que en aquellas situaciones en las que no es posible intervenir -como en las investigaciones cosmológicas- ni confirmar independientemente los *outputs* obtenidos -como en el caso de las mitocondrias- aún es posible validar la observación si las teorías que están supuestas en el diseño y el funcionamiento del aparato son teorías bien corroboradas, teniendo en cuenta que:

La evidencia que apoya la teoría también provee razones para creer en los resultados de las observaciones. (Franklin, 1989, p. 440).

En general, este criterio no se utiliza de manera aislada, aun cuando se posean buenas razones para considerar que los instrumentos funcionan correctamente. Un caso

interesante que muestra la insuficiencia de la aplicación de este criterio en la validación de una observación, es el que proporciona Rasmussen (1993, 2001) acerca del estatus ontológico de los mesosomas bacterianos. Éstos, que comenzaron siendo considerados organelas de las bacterias, resultaron finalmente ser un artefacto causado por ciertas técnicas histológicas empleadas en la observación. Los mesosomas fueron observados sólo por medio de microscopios electrónicos y en ciertos casos en los que las muestras eran tratadas con tinciones específicas. Si bien era teóricamente posible, dado su tamaño, detectarlos con microscopios ópticos, su presencia no fue registrada por este medio. Tampoco pudo detectarse ninguna diferencia entre la supuesta membrana del mesosoma, y la membrana citoplasmática de la bacteria apelando a tratamientos bioquímicos. Si bien los mesosomas fueron aceptados, durante un período, como estructuras reales de las bacterias, el fracaso en los intentos por encontrar características propias de estas organelas mediante técnicas bioquímicas, y de establecer su función, así como la imposibilidad de constatar la presencia de las mismas con otras técnicas, contribuyeron a considerar las observaciones como artefactos.

Eliminación de las fuentes de error

La eliminación de las fuentes de error es una estrategia fundamental en la práctica experimental. Si consideramos un experimento como un sistema causal de interacciones físicas (Brown, 1989), al utilizar este criterio se busca satisfacer la exigencia de la cadena causal lineal, esto es, reducir a una sola el número de posibles causas del fenómeno observado. Si en cambio, pensamos en la experimentación teniendo en cuenta el enfoque informacional (Dretske, 1981, Shapere, 1983) este criterio trataría de satisfacer la demanda de transmisión de toda la información generada por la fuente, esto es, la eliminación de equívocidad.

Deborah Mayo en *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, entiende que es satisfaciendo este criterio que la práctica experimental produce conocimiento confiable. Según la autora, todas las estrategias expuestas en este capítulo pueden reducirse a la eliminación del error por medio de pruebas severas (*severe tests*). Mientras que Franklin y Hacking buscan aumentar el grado de creencia en un resultado, Mayo considera que puede alcanzarse el mismo objetivo por medio de lo que denomina *argumento del error*.

Se acepta que el error está ausente cuando en un procedimiento de investigación (que puede incluir varias pruebas) existiendo una probabilidad alta de detectar un error si existe, de todos modos no lo detecta y por el contrario, produce un resultado que concuerda con la ausencia del error. (Mayo, 1996, p. 64).

Dicho de otro modo, si para un experimento dado las pruebas severas no detectan el error, puede afirmarse con probabilidad que el *output* no es un artefacto. Sin embargo, puede abordarse la eliminación del error sin apelar a la noción de severidad y a la probabilidad de detección de errores.

Consideremos cómo, sobre la base del conocimiento disponible y aceptado acerca del fenómeno que se intenta estudiar, se busca eliminar las fuentes de error en un experimento. Para ello recordemos los intentos de detección de ondas de gravedad de Joseph Weber. Como indicamos en el capítulo cuarto, las ondas de gravedad son señales sumamente débiles y, por lo tanto, de difícil detección. Por lo tanto, el aparato debía ser sumamente sensible, pero, a su vez, la extremada sensibilidad del instrumento posibilitaba la detección de numerosas señales parásitas. Para filtrarlas, Weber tomó una serie de precauciones, entre ellas: el detector fue colocado en una cámara en la que previamente se había hecho vacío, fue aislado del piso del laboratorio de modo tal que las vibraciones del suelo no fueran confundidas con detección de ondas de gravedad. Además, al ser el ruido termal ineliminable⁷² Weber fijó un umbral de aceptación de los pulsos, estableciendo un umbral a partir del cual la señal recibida podría considerarse producto de la detección de ondas de gravedad. Finalmente, construyó otro detector idéntico y lo ubicó en un laboratorio alejado, de modo que tomó en cuenta sólo aquellas señales coincidentes registradas por los dos aparatos.

⁷² Por la misma sensibilidad del detector, éste era capaz de captar hasta las vibraciones de las moléculas constitutivas del aparato, y el único modo de eliminarlas consistía en mantener el instrumento a una temperatura de 0° Kelvin, en la cual se produce el mayor ordenamiento de la materia y el movimiento molecular cesa.

9.3 Evaluación de los *datos*

Consideraremos que una estrategia epistemológica se aplica a los *datos* de un experimento cuando con ésta se evalúe no ya la imagen en general, sino a la instancia inmediatamente posterior en la que ha habido alguna forma de conceptualización.

Datos que presentan comportamiento nómico

Un argumento que puede emplearse para argumentar a favor de la validez de un *dato* es que éste posea comportamiento nómico. Como ejemplo, Franklin (1989, p. 441) propone las observaciones de Galileo en torno a las lunas de Júpiter. Si bien el telescopio utilizado no era un instrumento extremadamente confiable, las entidades observadas podían ser discriminadas de artefactos, dado que obedecían las leyes de Kepler y presentaban eclipses, propiedades que difícilmente presente un artefacto. Según Franklin, el ejemplo no es históricamente correcto, ya que en el momento en el que Galileo realiza el descubrimiento de los satélites, entre 1608 y 1610, él todavía no conocía las leyes de Kepler. Yo no estoy absolutamente segura de que éste sea el caso. La correspondencia entre Galileo y Kepler comienza, según Koestler (cf. 1959, cp. 8) en 1597, y Kepler finaliza *Astronomía Nova* en 1609. Galileo podría haber tenido novedades acerca de las tres leyes keplerianas. De todos modos, sea anacrónico o no, el ejemplo ilustra claramente la estrategia.

Confirmación independiente

Con este criterio se sostiene que la posibilidad de observar un mismo rasgo en un espécimen, por medio de dos –o más– instrumentos que funcionen bajo principios físicos diferentes es una razón para considerar que los rasgos observados pertenecen efectivamente a la entidad estudiada, no siendo artefactos causados por los dispositivos utilizados. Ahora bien, ¿Qué presupuestos involucra la aceptación de la confirmación independiente? En principio, la aceptación de ausencia de unidad de la ciencia es un requisito necesario para poder aceptar este criterio. Pero ¿Cómo se entiende esta

desunidad? Al momento de distinguir artefactos de efectos reales, la ausencia de unidad que nos interesa es fundamentalmente la fenoménica. Dice Hacking:

Todos los microscopios luminosos, obviamente, utilizan luz; pero la interferencia, la polarización, el contraste de fase, la transmisión directa, la fluorescencia, etc. explotan aspectos fenoménicos de la luz esencialmente no relacionados entre sí. Si la misma estructura puede ser distinguida utilizando estos aspectos distintos de las ondas luminosas, no podemos suponer seriamente que la estructura es un artefacto de todos estos sistemas físicos diferentes. (Hacking, 1983, pp. 203-204).

Esto es, si bien todos los microscopios luminosos producen imágenes causadas por fotones, las imágenes obtenidas en los distintos microscopios se producen por propiedades diferentes aplicadas en el diseño y la construcción de cada instrumento. Pero no siempre la diferencia reside en lo fenoménico. En otros casos, la independencia es ontológica. Los microscopios bien pueden no utilizar fotones, sino haces de electrones así como ondas sonoras. Afirma Hacking al comparar los resultados de observaciones de cuerpos densos con un microscopio electrónico y un microscopio óptico de fluorescencia:

Dos procesos físicos –la transmisión electrónica y la reemisión fluorescente- se usan para detectar los cuerpos. Estos procesos no tienen prácticamente nada en común. Son esencialmente partes de la física no relacionadas. Sería una coincidencia ridícula si, una y otra vez, dos procesos físicos totalmente diferentes produjeran configuraciones visuales que fueran, no obstante, artefactos de esos procesos físicos y no estructuras reales de la célula. (Hacking, 1983, p. 201).

Puede objetarse que la afirmación anterior supone una inferencia a la mejor explicación, por cuanto indicaría que la mejor explicación disponible para dar cuenta de la presencia de una serie de rasgos comunes en el espécimen observado por medio de instrumentos cuyo funcionamiento se sustenta en sistemas causales diferentes, es considerar que esos rasgos fueron producidos por algo más que errores sistemáticos de los aparatos (debería producirse el mismo error en todos los instrumentos utilizados y en todas las observaciones realizadas con cada aparato). Si bien Hacking acepta que el argumento utilizado es abductivo, no pretende extraer las consecuencias tradicionales en defensa del realismo; no pretende inferir que las teorías científicas que sustentan la

interpretación de los rasgos observados sean verdaderas o aproximadamente verdaderas, ni tampoco afirmar categóricamente la existencia de la entidad en estudio, sino sólo establecer una conclusión localizada, en sus términos:

Digo que si puedes ver los mismos rasgos fundamentales de la estructura utilizando diferentes sistemas físicos, entonces tienes una excelente razón para decir, *esto es real* en lugar de *esto es un artefacto*. No es una razón concluyente. (Hacking, 1983, p. 204).

La confirmación independiente apela a procesos físicos que permiten observar un mismo tipo de entidad, procesos que son físicamente diferenciables y que, como resultado, manifiestan la presencia de rasgos similares, lo que hace implausible atribuir dicha persistencia al error, es decir, a artefactos producidos por ambos instrumentos. La siguiente figura muestra dos colonias de bacterias observadas con dos tipos de microscopios:



Figura 9. Dos grupos de *Micoplasmas beta hemolíticos* observados con: (A) microscopio óptico. (B) microscopio electrónico de transmisión.

Ahora bien ¿Qué significa que los *mismos rasgos* de una estructura se observen por medio de sistemas físicos diferentes? Cuando de microscopía se trata, las muestras a observar tienen que tratarse con tinciones específicas que dependen en parte de las características del instrumento de observación y en parte de la muestra a observar. Cuando afirmamos que es posible ver los mismos rasgos de una estructura, queremos decir que, en la mayor parte de los casos, podremos ver en dos preparados diferentes, el mismo tipo de rasgos de un mismo tejido. En otras palabras, si bien en general resulta posible realizar más de un preparado de una misma entidad para su observación con instrumentos diferentes, aquello que observamos por medio de diferentes técnicas no es

el *mismo* sustrato, dado que las muestras observadas deben ser tratadas con procesos químicos diferentes que, en muchos casos, impiden que lo que es visto con un microscopio pueda verse con otro que funciona sobre principios físicos distintos. Dado que preparar una muestra para su estudio con un microscopio óptico requiere el uso de determinadas tinciones, cortes de ciertas características y montajes particulares, esto puede impedir una correcta inspección del preparado en microscopios diferentes a los previstos. En el caso de la microscopía electrónica, la preparación exige cortes ultrafinos de la muestra, deshidratación, montaje, tinciones especiales e involucra una serie de procesos complejos, de modo tal que los rasgos presentes en un mismo preparado no pueden ser observados tanto con un dispositivo como con otro. Sí es posible estudiar una muestra preparada para ser observada con un microscopio electrónico, por medio de un microscopio óptico, pero en general no a la inversa y en ese sentido la observación no puede ser la misma. Veamos para ilustrar lo anterior, imágenes de acinos pancreáticos en la que esto se pone de manifiesto.

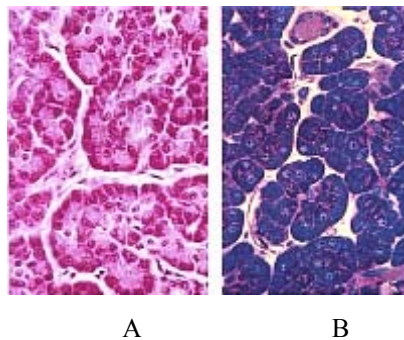


Figura 10. Acinos pancreáticos preparados para diferentes técnicas de microscopía y observados con microscopio óptico. Tinciones específicas. (A) hematoxilina y eosina. (B) Azur y azul de metileno.⁷³

Sin embargo, las muestras podrían ser tomadas de un mismo tejido, perteneciendo éste al mismo organismo, con lo que resultaría pertinente afirmar que los rasgos observados pertenecen a una misma clase de entidades. Lo anterior a su vez será complementado –en el caso de la histología, por ejemplo- con análisis químicos, y técnicas apropiadas para determinar si la identidad de las estructuras observadas se corresponde con una identidad en lo que concierne a la composición química y

⁷³ Tomado de Leeson, Leeson y Paparo (1989).

funciones biológicas. La limitación anterior se presenta en ciertas situaciones, pero en muchos casos es posible observar por diferentes microscopios una misma entidad, para ello repararemos en las siguientes imágenes:

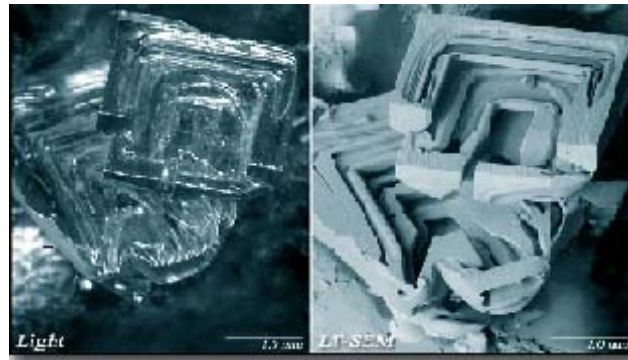


Figura 11. Un cristal de nieve observado con un microscopio óptico y con un microscopio electrónico de barrido de baja temperatura.⁷⁴

En este caso, el cristal observado no requiere ningún tratamiento específico. De modo que puede ser indistintamente observado con ambos instrumentos, en este caso, un microscopio óptico y un microscopio altamente sofisticado como es el microscopio electrónico de barrido de baja temperatura.

Una última aclaración respecto de la confirmación independiente. Si bien Hacking toma como casos paradigmáticos ejemplos provistos por la microscopía, esta estrategia puede extenderse a los experimentos en general, siempre que exista la posibilidad de estudiar un fenómeno por medio de sistemas causales no relacionados, o de medir magnitudes con instrumentos que cumplan con los requisitos antes mencionados.

Calibración

Calibrar un instrumento es efectuar un conjunto de procedimientos para hacer coincidir los valores que éste proporciona con los valores de un patrón de medición. La calibración es un procedimiento rutinario en la actividad científica y permite eliminar el error sistemático que se produce en las mediciones como consecuencia de una variación

⁷⁴ Tomado de www.ipsi.barc.usda.gov Página del *Plant Science Institute* USDA, Beltsville, Maryland.

en la escala del aparato.⁷⁵ La calibración permite comprobar en cada secuencia experimental el buen funcionamiento del instrumento por medio del uso de una señal que ya es conocida por el usuario, es decir, el patrón de medición que mencionamos más arriba. Franklin sugiere, además, otra forma de *calibración* que consiste en la reproducción de artefactos cuando se sabe que deben estar presentes,⁷⁶ como es el caso de las muestras impuras, que presentan una desviación predecible respecto de los resultados que produciría una muestra pura. En esta variante se apela al incremento de confianza en la operación del aparato en aquellos casos en los que una cierta desviación es esperada y esta desviación se produce. Dice Franklin respecto del valor de la calibración:

La calibración, el uso de una señal conocida para estandarizar un instrumento, es una estrategia importante para establecer la validez de los resultados experimentales. Si un aparato reproduce fenómenos conocidos, entonces fortalecemos de manera legítima nuestra creencia en el buen funcionamiento del aparato y en la confiabilidad de los resultados que proporciona. (Franklin, 1999, p. 237).

La calibración no se aplica directamente al *output*, sino que es un criterio de control y evaluación del *dato*, que es la primera instancia de conceptualización teórica que distinguimos.

Es preciso destacar que existen distintas situaciones experimentales y que, la calibración en cada uno de estos casos permitirá un grado diferente de apoyatura respecto de la corrección del *dato* obtenido. Mencionaremos a continuación las situaciones:

- 1- La señal con la que el instrumento se calibra es provista por distintos tipos de instrumentos: en esta primera situación que distinguimos, el instrumento se calibra disponiéndose, para ello, de un *input* conocido y establecido por diferentes instrumentos que funcionan bajo procesos físicos causalmente no relacionados. Por ejemplo, se calibra una balanza electrónica apelando a un

⁷⁵ Dado que el anterior no es el único tipo de error sistemático, no podemos afirmar que la calibración elimine este clase de error en sentido estricto. Por ejemplo, el error de paralaje es independiente de la calibración del instrumento.

⁷⁶ Así lo presenta Franklin (1989) En trabajos posteriores (Franklin, 2002b) consideró la reproducción de artefactos como una estrategia independiente de la calibración.

objeto de peso determinado, y el peso de este objeto se constata con una balanza de otra clase.

- 2- La señal con la que se calibrará el aparato es provista por un único tipo de instrumento. Podríamos pensar, por ejemplo, en un voltímetro y una batería. En este caso, se conoce el voltaje de la batería y se utiliza esa información para evaluar el funcionamiento del instrumento. En este tipo de situaciones también poseemos buenas razones para considerar que el aparato funciona correctamente si éste es capaz de registrar el voltaje esperado. Sin embargo, nuestra confianza en la calibración es menor que en el caso anterior ya que no poseemos confirmación independiente de la magnitud del patrón de medición.
- 3- El aparato se ha diseñado para detectar un fenómeno que no ha sido observado aún y cuya existencia se desconoce. En este caso es preciso apoyarse en una caracterización teórica del fenómeno que se intenta detectar. Conjeturando cuáles serán las propiedades del fenómeno y cuál su comportamiento se elige una señal que se presume similar para calibrar el instrumento. Esto es, desde luego, problemático, ya que no hay certeza respecto de la similitud entre la señal con la que el detector se calibra y la señal para la cual el instrumento se ha diseñado. En los experimentos para la detección de radiación gravitatoria, por ejemplo, algunas de las antenas utilizadas se calibraron con pulsos acústicos. La inferencia realizada en este episodio es que las ondas de gravedad son semejantes a las ondas sonoras respecto del efecto sobre el detector.

9.4 Evaluación del *e-resultado*

Como explicamos en el capítulo anterior, el *e-resultado* es el constructo que se obtiene luego de efectuar el análisis estadístico de los *datos* en el caso de experimentos en los que se trabaje con propiedades cuantitativas o, si los experimentos son de carácter cualitativo, se trata del constructo que se obtiene tras estabilizar y controlar que los datos sean robustos. Las estrategias epistemológicas que describimos y analizamos a continuación se aplican a este componente del resultado experimental. Allan Franklin

presenta como una única táctica que denomina “el uso de argumentos estadísticos” a las tres primeras estrategias que presentamos a continuación.

Variación de las técnicas de análisis estadístico

La estadística desempeña un papel fundamental en las ciencias empíricas y la elección de los métodos de análisis con los que los *datos* se reducirán es un capítulo primordial en el inicio de toda actividad experimental. En general para determinar qué método de reducción de datos es apropiado, debe considerarse el tipo de diseño experimental, el tipo de variable bajo estudio, etc. Sin embargo, dado que la elección de los métodos de análisis estadístico adecuados según el experimento es un capítulo de la metodología de la investigación científica, no estudiaremos aquí cómo se determina cuál es el tratamiento estadístico adecuado según la situación experimental.⁷⁷ Sí mencionaremos que los argumentos estadísticos tienen un valor inestimable cuando se trata de evaluar el *e-resultado* de un experimento arroja y discriminar entre artefactos y señales, que en este caso, serían producto de un tratamiento matemático inadecuado, que nos haga, por ejemplo, pensar que nuestros resultados son estadísticamente significativos cuando no son o, por el contrario, que nos hagan pensar que nuestros resultados son insignificantes, cuando son significativos.

Una estrategia para evitar estas situaciones es la siguiente. Si para una situación experimental dada, es posible tratar los datos obtenidos con más de un procedimiento de análisis estadístico y si, dada esta variación, el *e-resultado* obtenido no varía de manera sustantiva, tenemos buenas razones para pensar que el *e-resultado* obtenido no es producto de una elección inadecuada de la técnica de análisis de datos o de alguna forma de masaje estadístico (cf. Franklin, 2002, p. 38).

Variación del conjunto de datos a analizar

En línea con lo anterior, otra estrategia que se emplea habitualmente para determinar si el *e-resultado* de un experimento es robusto o no lo es, consiste en variar

⁷⁷ Para ello puede consultarse Baird (1988).

aleatoriamente el conjunto de datos que se someten al proceso de análisis estadístico, manteniendo constante el método de análisis (es la inversa de la estrategia anterior). Con ello se evalúa si el *e-resultado* varía significativamente al variar el pool de *datos* a analizar o si se mantiene robusto. Si se da la primera situación, es probable que el *e-resultado* sea un artefacto producto del tratamiento estadístico de los *datos*.

Explicitación del criterio en la selección de los datos a analizar

Otra estrategia de control de la conformación del *e-resultado* tiene que ver con la explicitación de los criterios por los cuales se descartan datos en el proceso de análisis estadístico. En muchas situaciones experimentales, ciertos datos no se consideran para el análisis estadístico posterior. Para ello se deben aportar razones que justifiquen su exclusión. En la buena práctica científica, los datos se omiten en virtud de que el instrumento no funcionaba correctamente, que las condiciones experimentales no eran las apropiadas, etc. Por ello, para garantizar que el *e-resultado* no es meramente el producto de una selección sesgada de datos una opción es justificar la omisión de aquellos datos que fueron omitidos.⁷⁸

Significación estadística de un efecto y desviación estándar

También los argumentos estadísticos proporcionan razones a favor de la corrección de un *e-resultado*. Para ejemplificar esto, comentaré el caso del descubrimiento de las corrientes neutras, un caso que Galison presenta con mucho detalle (1987) y que Mayo discute en su (1996).

Las corrientes neutras son reacciones en las que se produce un flujo de partículas sin carga, de modo más preciso, en una corriente neutra se emiten neutrinos y neutrones, sin que se liberen muones (que son partículas con carga, como los electrones y los protones). Los experimentos que se llevaron a cabo para determinar la existencia o no de corrientes neutras son en sí mismos fascinantes, tanto desde la perspectiva científica como por la relevancia epistemológica de este caso, dado que la observación a partir de

⁷⁸ Franklin, en su último libro, ejemplifica esta estrategia a partir de su análisis de los datos de la medición de la carga del electrón. Por esta investigación, Millikan, fue acusado de eliminar datos relevantes para llegar a sus resultados. Estudiando los manuscritos del científico y eligiendo al azar los datos a considerar, Franklin defiende la pertinencia de las conclusiones de Millikan.

la cual se arriba a la conclusión de la existencia de tales corrientes es lo que suele denominarse una *observación sin interacción física*.⁷⁹ Aquí, sin embargo, no podemos dar cuenta de los detalles del experimento, y sólo indicaremos que la detección de muones en una cámara de burbujas se consideraba evidencia de la presencia de una corriente cargada y que, por el contrario, la ausencia de muones constituía evidencia de la existencia de corrientes neutras, lo que era más sencillo de determinar, ya que la observación positiva de las corrientes neutras requiere la detección del flujo de neutrinos y las características de las partículas vuelven prácticamente imposible el experimento.⁸⁰

Según Deborah Mayo (1996), la determinación de la significación estadística de un efecto es uno de los elementos que permite argumentar a favor de la presencia de un fenómeno. En este caso, la significación estadística se obtuvo calculando el cociente entre los eventos computados en los que no aparecen muones y los eventos en los que los muones están presentes. Cuanto mayor sea el valor del cociente, mayor será la probabilidad de que existan las corrientes neutras. Ahora bien ¿No puede este resultado ser debido no a la existencia de corrientes neutras, sino a fallas del aparato, que no permiten detectar los muones? Si éste es el caso, habría equivocidad en la información obtenida, los muones se producirían en el acelerador de partículas, pero no serían detectados. De modo que Mayo repara en la necesidad de calcular la probabilidad del efecto para el caso en que la hipótesis nula sea verdadera (la hipótesis nula afirmaría la no-existencia de las corrientes neutras). Una serie de nuevos experimentos se diseñó entonces para establecer qué efectos podrían simular una corriente neutra y cuál es la probabilidad de la ocurrencia de tales efectos en el transcurso del experimento. Si dicha probabilidad es elevada, no es prudente afirmar la observación de corrientes neutras. Para determinar la probabilidad de obtener un resultado determinado aun en el caso en que la hipótesis nula sea verdadera, se calcula el “*puntaje z*”, un parámetro que permite relacionar la media estimada para el caso en que la hipótesis nula fuese correcta con la media obtenida a partir de las mediciones realizadas. El *puntaje z* se expresa en unidades de desviación estándar, lo que a su vez permite conocer la probabilidad de la hipótesis nula a partir de los datos disponibles. Si el número de desviaciones estándar es

⁷⁹ Para consultar la historia de este experimento puede consultarse Galison (1987). Para un análisis de las observaciones sin interacción física y una descripción clara del caso, véase Cassini (2001) cp. 6.

⁸⁰ Lo maravilloso de este experimento es que no detectar neutrinos ni muones es, precisamente, detectar neutrinos.

mayor que tres, la probabilidad de que la hipótesis nula sea verdadera es baja, de modo que puede rechazarse.

Explicación del *e-resultado* a partir de una teoría sistemática

A diferencia de Ian Hacking, Friedrich Steinle y Michael Heidelberger, Allan Franklin no acepta lo que nosotros denominamos la autonomía constitutiva de la experimentación. Para él, la teoría está siempre presente en la experimentación, manifiesta tanto en la carga teórica instrumental como en la interpretación de los resultados experimentales. Ello le permite, por lo tanto, incluir como parte de la epistemología del experimento la estrategia que comentaremos a continuación. En el marco teórico que hemos propuesto para el análisis de los resultados experimentales, esta estrategia se aplicaría al *t-resultado*.

Según Franklin, y coincido con su postura, la disponibilidad de una teoría compatible con el *e-resultado* obtenido en un experimento es una razón de peso para considerar que éste es válido (*viz a viz* un artefacto generado en algunas de las instancias previas de producción material o de interpretación). Desde luego, en la medida en que esta estrategia se considera una estrategia epistemológica y no ya, un momento más de la interpretación de un resultado experimental (es decir, cuando se presenta como un criterio epistémico de validez y no de significatividad) debe aplicarse cautelosamente. Sólo podría apelarse a esta estrategia en los casos en que la teoría posea un conjunto de consecuencias observacionales que han sido corroboradas previamente. Podríamos reparar en la teoría de la relatividad, paradigma de teoría aceptada, cuyas predicciones corroboradas son numerosas y provienen de los campos más diversos. La deflexión de la luz en un campo masivo, el incremento de la masa de partículas aceleradas, el aumento de la vida media de partículas al ser sometidas a un campo gravitatorio, la explicación la anomalía del perihelio de Mercurio, ofrecerían razones para considerar que los *e-resultados* obtenidos en un experimento y que son compatibles con las expectativas teóricas que se derivan de esta teoría (y con el conocimiento relevante aceptado), son válidos. En el caso de las ondas de gravedad, por ejemplo, cuya existencia predice la teoría general de la relatividad, dicha predicción ha favorecido el desarrollo de detectores de las mismas y los resultados positivos serían bienvenidos, bajo ciertas condiciones, desde luego. En efecto, como hemos tenido la

oportunidad de estudiar en el capítulo cinco de esta tesis, no es suficiente la obtención de resultados positivos para afirmar la existencia de radiación gravitatoria, aun cuando ésta es una predicción de una de las teorías mejor corroboradas de la historia de la ciencia. En efecto, el resultado no sólo debe ser compatible con la teoría, sino que debe concordar con lo estimado tanto por la teoría de la que la predicción se deriva, como ser comprensible en el marco del conocimiento cosmológico actualmente aceptado.

9.5 Evaluación del *t-resultado*

En este caso se trata de estrategias que permiten juzgar la adecuación de la interpretación externa ofrecida. Por lo tanto, son estrategias que se aplican al *t-resultado*.

Utilización de las propiedades de los *t-resultados*⁸¹

Este criterio permitiría afirmar la corrección de un *t-resultado* si éste permanece robusto en una secuencia de experimentos. Para ilustrar esta estrategia hay numerosos ejemplos, pero detengámonos en la clásica determinación del número de Avogadro. En las investigaciones de Perrin acerca de la medición del número de moléculas contenidas en un mol de una sustancia, el valor obtenido se mantuvo constante al variar los métodos de medición. Trece experimentos diferentes proporcionaron resultados coincidentes respecto del número de Avogadro (cf. Salmon, 1984, quien lo utiliza como un argumento a favor del realismo de las entidades inobservables a ojo desnudo). La solidez de un *t-resultado* puede determinarse a partir de experimentos que investiguen un mismo fenómeno por medio de sistemas causales no relacionados. Esto es, el empleo de diseños experimentales diferentes que produzcan resultados coincidentes (o, al menos, convergentes), proporciona razones, que se refuerzan mutuamente, para argumentar a favor de la corrección del *t-resultado*.

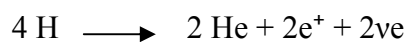
⁸¹ Franklin (2002) desarrolla como una misma estrategia el argumento de la solidez (*robustness*) de los resultados y del acuerdo entre resultados y predicciones teóricas. Sin embargo, considero necesario distinguir los dos casos ya que no están necesariamente relacionados.

Eliminación de explicaciones alternativas⁸²

¿Qué sucede cuando el *t-resultado* de un experimento entra en conflicto con predicciones teóricas? ¿Obedece la discrepancia a una falla en el experimento o es acaso necesario revisar las teorías que acomodarían los resultados? En estas situaciones: ¿cómo determinar si es la teoría la que requiere una modificación o si el experimento no fue bien realizado? El caso de los neutrinos solares es un muy buen ejemplo para ilustrar la estrategia que ahora presentamos. Raymond Davis, el primer investigador que desarrolló un detector de neutrinos solares, no obtuvo resultados que confirmaran las expectativas teóricas, por el contrario, su detector captó sólo un tercio de los neutrinos previstos. La polémica respecto de los neutrinos faltantes comenzó hace unos cincuenta años y todavía hoy se discute el caso, que fue denominado *neutrino puzzle*. Dicen Bahcall y Davis:

Durante los últimos 15 años, hemos intentado, en colaboración con numerosos colegas astrónomos, químicos y físicos, comprender y contrastar la teoría sobre la producción de energía en el Sol. Hemos sido sorprendidos por los resultados: existe una diferencia importante e inexplicable entre la observación y la supuestamente bien establecida teoría. Esta discrepancia ha ocasionado una crisis en la teoría de la evolución estelar, muchos autores están cuestionando algunos de los principios básicos en este tema, supuestamente resuelto. (Bahcall y Davis, 1976, p. 264).

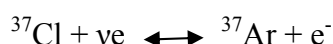
Se estima que el Sol produce energía por medio de reacciones nucleares, particularmente la fusión nuclear, teniendo como principal fuente el hidrógeno. La reacción que representaría la producción de energía solar a partir del hidrógeno sería la siguiente:



En esta reacción, cuatro átomos de hidrógeno reaccionan formando dos átomos de helio y liberando dos positrones y dos neutrinos electrónicos. La fusión nuclear prosigue, generando elementos cada vez más pesados y produciendo más neutrinos.

⁸² Franklin presenta este criterio conjuntamente con el anterior, denominándolos “La estrategia de Sherlock Holmes”. Mi apreciación es que deben ser analizados separadamente porque la eliminación de las fuentes de error se aplica a los *outputs* y la eliminación de explicaciones alternativas, al obtener los *e-Resultados*. Esta estrategia es análoga a lo que Peter Galison en su (1987) denomina *análisis de background*.

El detector de Davis consistía en un tanque de tetracloroetileno ubicado en las profundidades de una mina en Estados Unidos rodeado por un *escudo de agua*. Tanto la elección del lugar como la protección del tanque obedecen a la intención de aislar el detector de la incidencia de rayos cósmicos, un factor de ruido que fue tomado en consideración en el diseño experimental. El solvente utilizado tiene la siguiente particularidad: cuando un neutrino de alta energía -tal es la característica de los neutrinos electrónicos provenientes del Sol- colisiona con un átomo de cloro, reacciona formando argón radioactivo, según la reacción:



El argón puede a su vez ser aislado y contabilizado gracias a sus propiedades radioactivas. Si por cada neutrino que interacciona con el cloro presente en el detector se produce un átomo de argón, entonces, la cantidad de argón presente es una medida de los neutrinos detectados. Recordemos nuevamente que la tasa de argón es inferior a la que debería obtenerse conforme a las predicciones teóricas. El *t-resultado* del experimento es 2.56 SNU (*solar neutrino units*).⁸³ Mientras que la predicción provista por el modelo solar estándar era 7.6 SNU (cf. Davis, 2002).

Presentaré a continuación las explicaciones propuestas para dar cuenta de las diferencias entre la predicción teórica y el *t-resultado* de Davis. Luego, indicaré las razones aducidas para la eliminación de las explicaciones sugeridas.

Fallas en el diseño experimental: Jacobs (1975) propuso que el solvente utilizado en el detector puede, bajo ciertas condiciones, formar polímeros, éstos, a su vez, se combinarían con el argón radioactivo producido por la colisión de un neutrino con un átomo de cloro, y por lo tanto, el neutrino no sería contabilizado. Según esta hipótesis, la tasa de neutrinos prevista sería correcta y el problema radicaría en que el canal tiene equivocidad, es decir, habría una pérdida de la información originada en la fuente. Los neutrinos emitidos en el núcleo del Sol como producto de la fusión de hidrógeno llegarían al receptor en la tierra pero éste sería incapaz de detectarlos. Bajo esta propuesta, el *t-resultado* no se admite y se conserva la predicción teórica.

⁸³ SNU es la unidad con la que se describe la captura de neutrinos: 10^{-36} captura por átomo *blanco* (target atom) por segundo.

La comprensión del neutrino y de sus propiedades es insuficiente: la información que poseemos sobre los neutrinos se basa en el modelo estándar de partículas elementales y en la teoría de las interacciones débiles. Diversas modificaciones de las teorías mencionadas se propusieron para interpretar los resultados del experimento, por ejemplo, si la interacción débil no fuese el tipo de interacción del neutrino, en el trayecto recorrido desde el centro del Sol hasta el receptor podría o bien variar su energía interactuando con otras partículas o bien combinarse con éstas y por ello no sería detectada la cantidad esperada. Otra explicación, en una línea similar, sostiene que la interacción débil no es comprendida adecuadamente; por ejemplo, Bandyopadhyay (1972) propuso una teoría de las interacciones débiles no estándar. Otra propuesta fue la desintegración de las partículas. Si fuera este el caso, los neutrinos tendrían una vida media limitada de menos de ocho minutos –que es el tiempo empleado por un neutrino para recorrer la distancia desde el Sol a la Tierra- antes de desintegrarse en otra partícula y por ello no serían detectados (cf. Franklin, 2002, p. 207). Por su parte, Bruno Pontecorvo, en 1957, había considerado la posibilidad de que el neutrino fuese una partícula masiva lo que le permitiría oscilar en distintos estados, de modo que en el trayecto desde el centro del Sol en el que es emitido hasta el receptor, la partícula oscilaría en diferentes variedades de la entidad, es decir, oscilaría a la variedad tauónica o muónica. En este caso, nuevamente, los neutrinos previstos llegarían al detector, pero éste, preparado sólo para detectar neutrinos electrónicos, no detectaría los restantes. Según esta explicación el arreglo experimental sería equívoco, porque captaría los neutrinos electrónicos que llegan al detector, pero no la totalidad de los neutrinos solares.⁸⁴ Además, sería preciso modificar el modelo estándar de partículas elementales, incorporando la masa no-nula de los neutrinos, algo que la teoría, si bien no prevé, tampoco prohíbe. Ello, a su vez, repercutirá en el desarrollo de un nuevo experimento destinado a captar tanto los neutrinos electrónicos como las otras variedades. En todos estos casos, se considera acertado el *t-resultado* y se invita a revisar las teorías que permiten realizar la predicción de la tasa de neutrinos solares.

Errores en el modelo del Sol: Si al menos uno de los supuestos involucrados en la construcción del modelo solar fuese falso, podría suceder que la producción efectiva de neutrinos solares fuese menor a la predicha y que el *t-resultado* del experimento fuese correcto. Esto se cumpliría, por ejemplo, si la cantidad de hidrógeno existente en el Sol

⁸⁴ En tanto detector de neutrinos electrónicos sería eficiente, pero no así como detector de neutrinos solares, si no todos los neutrinos solares fuesen electrónicos.

fuese menor a la supuesta, con lo que la tasa de neutrinos producidos en un intervalo temporal dado sería menor a la calculada. También podría ocurrir que la producción de energía en la estrella no obedeciera a la teoría actualmente aceptada de las reacciones nucleares o no se produjera a partir de la reacción protón-protón, que describimos antes. Nuevamente, de acuerdo con estas propuestas, no sería necesario revisar el experimento, sino modificar el modelo solar.

Veamos ahora, qué explicaciones se eliminaron y las razones para ello:

La sugerencia de Jacobs fue contemplada en un experimento independiente realizado por Leventhal y Friedman (Bahcall y Davis, 1976) en el que se mostró que la formación de polímeros era altamente improbable.

El experimento de Davis se ha repetido con variantes y en todas ellas la tasa de neutrinos detectados es inferior a la prevista. Las variantes a las que aludo se relacionan con el cambio del compuesto utilizado. Tanto en *Gallex* como en *Sage*,⁸⁵ el reactivo empleado es el galio. En estos casos, la tasa de neutrinos detectada es mayor a la obtenida por Davis -aunque menor que la esperada- porque los detectores construidos a base de galio, permiten captar neutrinos de menor energía que el que funciona a base de cloro (es decir que la banda de detección es mayor que en el experimento de Davis).

A su vez, dado que los modelos solares involucrados en el establecimiento de la tasa de neutrinos fueron corroborados por vías independientes, la comunidad científica consideró apropiado desestimar aquellas interpretaciones que apelasen a modificaciones del modo de producción de energía en el interior del Sol.

Tampoco la hipótesis de la desintegración de los neutrinos convenció a la comunidad científica como una explicación de la diferencia entre expectativas teóricas y resultados experimentales. Ésta se rechazó cuando pudieron captarse neutrinos electrónicos provenientes de una supernova situada a una distancia mucho mayor que la que separa a la Tierra del Sol.

Finalmente, el experimento denominado *Superkamiokande* determinó que los neutrinos atmosféricos poseen masa, lo que vuelve plausible que los neutrinos solares también sean masivos, lo que a su vez apoyaría la hipótesis de la oscilación de estas partículas.⁸⁶ Lo anterior, conjuntamente con una anomalía en las tasas de producción de

⁸⁵ Gallex (ahora conocido como Gallium Neutrino Observatory) y Sage son experimentos desarrollados para medir la tasa de neutrinos solares. El primero se realiza en Italia y se encuentra bajo la dirección de Wolfgang Hampel desde el año 1991, mientras que el segundo detector se sitúa en Rusia y trabajan conjuntamente equipos de investigación rusos y americanos.

⁸⁶ Es preciso tener en cuenta que la masividad de una partícula es condición necesaria para su oscilación.

berilio y boro en el Sol, (Raghavan, 1995) indicaría que la hipótesis más adecuada para explicar la discrepancia entre predicción y resultados experimentales es la oscilación de los neutrinos y no una falla del experimento (cf. Franklin, 2004, cp. 9). Con ello, queda constituido el *t-resultado*.

9.6 *AREr* y *j-autonomía*

Desde una perspectiva metodológica, la *epistemología de la experimentación* nos ofrece un panorama de las medidas que los científicos toman en su práctica cotidiana al momento de sopesar el valor evidencial de los resultados experimentales. En este capítulo, buscamos ofrecer un análisis cuidadoso desde un punto de vista filosófico e integrar la *epistemología del experimento* en el contexto de la semántica de los resultados experimentales. Como ya mencionamos, la *j-autonomía* es la tesis según la cual la evidencia experimental se justifica o adquiere validez a partir de criterios que son internos a la práctica científica. En este sentido, las estrategias epistemológicas que la posibilitan, en la medida en que se aplican en la práctica experimental, son una muestra de que los criterios internos tienen un impacto fortísimo en el establecimiento y en la aceptación de la evidencia empírica. La *autonomía de la justificación* de la evidencia empírica se cumple en la actividad experimental y se implementa a través de las estrategias que discutimos. Habíamos dicho, además, que la defensa de la *j-autonomía* era una forma de bloquear el argumento del regreso del experimentador y, en efecto, éste es uno de los modos en los que Allan Franklin busca rebatir los argumentos de Harry Collins. Analizaremos, para concluir este capítulo, de qué manera y con qué limitaciones puede, la *j-autonomía* bloquear una salida externalista al regreso del experimentador en la replicación.

Tal como reconstruimos el argumento en el capítulo siete, *AREr* planteaba que, en casos de disconfirmación era preciso replicar el experimento original, que la replicación supone conocimiento tácito y que no es posible determinar si éste ha sido adquirido, que resultado correcto y experimento exitoso se determinan recíprocamente. Dado ese panorama y el fracaso del experimento cuando se lo considera desde una aproximación exclusivamente empírica (y aquí por empírico me refiero a lo siguiente: cuando se piensa que el experimento, por sí mismo y sin auxilio teórico, nos dice algo sustantivo

sobre el mundo), Collins nos instaba a aceptar como buena su explicación de la resolución del conflicto: el criterio de adecuación queda establecido por factores externos a la práctica científica. Son las luchas de poder y los intereses políticos y económicos los que terminan resolviendo las disputas epistémicas. Pero ¿es ésta la única respuesta? ¿Es ésta una buena respuesta?

La *j-autonomía* muestra que, independientemente de la posibilidad empírica o no de la replicación, los resultados experimentales satisfacen un conjunto de controles y pruebas que nos dan buenas razones para considerarlos válidos. Cada uno de los elementos constitutivos de un resultado experimental satisface, en la buena práctica científica, un conjunto de controles experimentales y teóricos que permiten que los aceptemos sobre la base de criterios internos. Desde luego, no debe pretenderse que la aplicación de las estrategias que aquí mencionamos proporcione siempre razones suficientes para su corrección. Esto es lo que diremos acerca de la resolución del regreso en la replicación y la autonomía respecto de la justificación. Quienes estén interesados en evaluar otras respuestas posibles al argumento, esta vez cuestionando la replicación como medio privilegiado de contrastación o cuestionando la indetectabilidad de la transferencia del conocimiento tácito pueden continuar leyendo el apéndice a la tesis antes de leer la conclusión de esta investigación.

Conclusiones

Algunos niños gustan de jugar con las palabras. Eligen, por alguna razón desconocida y mágica, algún vocablo que les resulta llamativo y lo repiten hasta liberarlo de su significado, lo convierten en música. A veces los filósofos juegan a ser niños que juegan con palabras. Toman una tesis o una frase y la repiten. La vacían del contenido inicial, sustituyen éste por otro. La idea se vuelve popular y aparece en tantas publicaciones que casi nos parece descabellado cuestionarla. Pero cuando resistimos ese impulso inicial y en pleno ejercicio de nuestra actividad nos preguntamos: ¿qué quiere decirse exactamente con esto?, ¿a qué me comprometo cuando acepto esto?, podemos sorprendernos. Algo así ha sucedido con la expresión *la vida propia del experimento*. En su artículo *Do Thought Experiments Have a Life of Their Own?* Hacking llega incluso a afirmar lo siguiente:

Hace más de una década, escribí que los experimentos poseen una vida propia. Intentaba en parte recuperar el hecho de que los experimentos son orgánicos, se desarrollan, cambian, y, sin embargo, retienen una forma de desarrollo a largo plazo que nos permite hablar de repetir y replicar experimentos. [...]. Pienso en los experimentos como teniendo una vida: madurando, evolucionando, adaptándose, siendo no solamente reciclados, sino, literalmente, *re-herramientizados (re-tooled)*. (Hacking, 1992, p. 307).

Si hay una idea que no se desprende en absoluto de su libro *Representing and Intervening* es, precisamente, una concepción evolutiva del experimento, y, sin embargo, aparece como un posible significado de la tesis, en otro trabajo, escrito diez años más tarde. Esta sugerencia aislada me ha parecido tan confusa que omití analizarla en este trabajo deliberadamente. Aquí intentamos resistirnos a la musicalidad del eslogan y a su aceptación por *familiaridad*. Intentamos desmenuzarlo y, al hacerlo encontramos un conjunto de sentidos diferentes cobijados todos bajo la vida propia del experimento. Nos detuvimos entonces en aquellas tesis con contenido filosófico sustantivo y notamos la relevancia que dos de las *formas de vida* que se le atribuyen habitualmente al experimento tienen en el momento de ofrecer una respuesta cuidadosa

a ciertos resultados de la sociología de la ciencia contemporánea, en particular, y como estudiamos aquí, al trabajo de Harry Collins.

Nuestro compromiso descriptivista nos llevó a analizar un conjunto de experimentos paradigmáticos, ellos nos permitieron constatar que un resultado experimental no es una entidad *atómica*, sino que está conformado por cuatro partes, por cuatro elementos diferenciables. El *output*, aquello perceptible por alguno de nuestros sentidos desnudos, el *dato*, producto de un proceso de conceptualización a partir del contenido no conceptual del *output*, y cuya conformación depende de los intereses del experimento y de las particularidades del arreglo experimental; el *e-resultado*, que es el producto de la estabilización o de la reducción estadística de los *datos* y, finalmente, el *t-resultado*, fruto de una nueva conceptualización, en este caso, vía la subsunción teórica. La generación de los elementos que conforman a un resultado experimental depende, como hemos visto, de sendos procesos de interpretación teórica. Este análisis nos condujo entonces a la pregunta por una de las formas en las que la autonomía de la experimentación se había defendido: la autonomía constitutiva: ¿de qué modo podemos comprenderla?, ¿se satisface en la práctica experimental?, ¿cómo moderar la tesis?, ¿qué consecuencias trae su aceptación?

Nos ocupamos, además, de un problema con el que los estudios etnometodológicos de la sociología de las ciencias naturales nos interpelan: la generación de conocimiento experimental. Nos detuvimos en los resultados de las investigaciones de Harry Collins y en el regreso en el que, según el sociólogo, incurren los experimentadores cada vez que intentan incrementar nuestro conocimiento sobre el mundo empírico. En este caso, tuvimos ocasión de notar que lo que Collins entiende como *el* argumento del regreso del experimentador, en rigor, son dos argumentos, y aquel que él considera *el* regreso, no queda capturado por una regresión al infinito, sino que se trata de un argumento por reciprocidad. Hay dos formas en las que lo que Collins llama *regreso del experimentador* puede ocurrir: al intentar determinar si un experimento es la réplica o no de un experimento previo y al intentar determinar si un resultado experimental es correcto o incorrecto. Evaluamos si estábamos compelidos a aceptar la resolución externa del conflicto y nuestra respuesta fue negativa en ambos casos. En primer lugar, la explicitación de la semántica de los resultados experimentales nos permitió, a la par que moderar la idea de la *c-autonomía*, mostrar que parte de la conformación de un resultado experimental requiere de interpretación teórica. Por lo tanto, un resultado experimental nunca se conforma, exclusivamente a partir de las determinaciones de un

instrumento de medición o de un arreglo experimental, y, con ello, una de las formas de determinar si un resultado experimental es correcto, consiste en determinar si éste puede ser subsumido bajo -o si al menos es compatible con- la teoría sistemática asociada al concepto teórico investigado. Ésta es una de las opciones que podemos adoptar frente al problema tradicional de la aceptación del conocimiento sintético: la vía coherentista. Como a Neurath le gustaba decir: *somos como marineros que deben reparar su barco en altamar, sin poder jamás desarmarlo en tierra firme para reconstruirlo a partir de sus mejores componentes*. Añadiría que, en la investigación de frontera, el mar es un mar embravecido. Y esta fue nuestra respuesta al *AREg*: esta reciprocidad entre el intento de determinar qué es un buen detector y cuál es el resultado correcto tiene lugar sólo si consideramos que la experimentación nos proporciona un acceso directo al mundo, independiente de toda mediación teórica. Dado que esto no es así, la determinación del resultado correcto es aún posible apelando exclusivamente a recursos internos a la práctica científica y no, como argumentaba Collins, a partir de recursos externos.

Mostramos, además, cómo *AREr* presupone la verdad de una de las premisas de *AREg*, que llamamos *tesis de la introducción experimental del resultado*, y cuya falsedad quedó puesta de manifiesto a partir de nuestro análisis de la *c-autonomía* y de los estudios de casos históricos de la primera parte de este trabajo. Mostramos, además, con el estudio de la *j-autonomía* y, en particular, de la epistemología del experimento, que existen numerosas herramientas científicas para evaluar la corrección de los elementos constitutivos de los resultados experimentales. En el apéndice consideramos otras posibles críticas al *AREr*. Allí ofrecemos un análisis epistémico germinal de la reproducción experimental, una elucidación del concepto de replicación y proponemos un método para determinar cuándo dos instrumentos son funcionalmente idénticos. Evaluamos, finalmente, si acaso la replicación tiene, como pretende Collins, valor disconfirmatorio y nuestra respuesta es negativa.

Estos son algunos de los resultados de este trabajo de investigación. Me gustaría señalar ahora algunos temas no explorados, de los que no pude ocuparme en este trabajo, pero que me interesaría abordar en el futuro. Quiero llamar la atención sobre tres temas, de distinto nivel de generalidad pero que sería deseable estudiar más profundamente, inclusive para revisar y complementar esta contribución. En primer lugar, un tema bastante acotado y cuyo tratamiento ha sido relegado en la filosofía de la experimentación. Me refiero a la reproducción experimental. Si bien nos ocupamos

brevemente de ésta en el apéndice, sería deseable un estudio más profundo. Nosotros distinguimos cuatro formas de reproducción experimental: *i-repetición*; *t-repetición*, *replicación* y *contrastación independiente*. Un análisis más detallado requeriría evaluar si, efectivamente, existen diferencias o no respecto del grado de confirmación de la corrección de un *e-resultado* cuando se utilizan distintas formas de reproducción.

En segundo lugar, un tema de carácter mucho más general. Nuestra respuesta al *AREg* está fuertemente inspirada en una solución coherentista al problema del conocimiento, y la idea que defendimos en la tercera parte de esta tesis y según la cual las teorías científicas bien establecidas son aquellas que nos proporcionan el criterio de corrección experimental, es particularmente deudora de esta posición. Sin embargo, un marco teórico con estas características puede tener consecuencias indeseables. Entre ellas, no parece poder explicar el cambio teórico de una manera enteramente satisfactoria. Uno podría aceptar el diagnóstico kuhniano: en ciencia normal, seamos conservadores, y si las anomalías se vuelven recalcitrantes entonces ¡revolución! Sin embargo, creo que sería interesante poder estudiar con más detalle este problema en particular.

Finalmente, aunque en línea con lo anterior, otro tópico que queda pendiente es el estudio del concepto de *error*, que aquí prácticamente no hemos mencionado. ¿Qué es el error?, ¿cómo se lo caracteriza? Teniendo en cuenta los distintos tipos de experimentos que distinguimos y los distintos elementos constitutivos de un resultado experimental, ¿podemos diferenciar distintos tipos de error asociados a las distinciones anteriores? Pero como suele decirse a menudo, ofrecer un tratamiento pormenorizado de estos problemas es una tarea que excede los límites de este trabajo y, por consiguiente, deberá quedar como objetivo para futuras investigaciones.

A.1 Reproducción, repetición, replicación: algunas precisiones conceptuales

Como habíamos estudiado en el capítulo séptimo, una de las tesis presupuestas en el regreso en la replicación está relacionada con las formas de reproducción experimental. Por ello, en esta sección, nos ocuparemos de analizar el concepto de *reproducción experimental*. En primer lugar, el concepto de reproducción experimental se utiliza en los casos en los que existe un resultado previo y se busca una comparación del resultado original con otro. Con ello, en esta búsqueda de comparación entre resultados, se presupone que aquel resultado experimental original ha sido evaluado, conforme con los procedimientos y estrategias que mencionamos en el capítulo noveno.

Como siempre, es deseable comenzar estableciendo algunas precisiones terminológicas. En lo sucesivo, a fin de lograr claridad en el tratamiento del tema, reservaremos el término *reproducción* como término general para los procedimientos que tienen como objetivo sea la medición o la determinación cualitativa de una misma propiedad, *repetición* como un caso especial de reproducción de acuerdo con ciertos criterios que explicitaremos enseguida, y *replicación*, como un caso límite de la repetición.

Lamentablemente, a pesar de la importancia que el problema de la reproducción de resultados experimentales reviste para la filosofía de la ciencia, este concepto no ha sido investigado aún con el detalle requerido.⁸⁷ De modo que resulta preciso evaluar en primer lugar, qué entendemos por *reproducción* y, si es posible, ofrecer una clasificación de las variedades de reproducción que sea a la vez epistemológicamente fértil y descriptivamente adecuada, en el sentido de no contener clases vacías,⁸⁸

⁸⁷ Cabe destacar aquí algunas excepciones: Franklin y Howson (1984), Hones (1990), Cartwright (1991) y Radder (1992). Sin embargo no se ha conseguido aún ofrecer un tratamiento sistemático de la reproducción experimental.

⁸⁸ Radder (1992) propone una clasificación que pretende ser exhaustiva en la que buena parte de las clases son lógicamente posibles pero empíricamente imposibles.

permitiendo entonces recuperar aquello que efectivamente se realiza en la actividad científica. Propongo que reparemos inicialmente en lo siguiente: teniendo en cuenta que la reproducción experimental es una condición necesaria para satisfacer la norma de intersubjetividad en la práctica científica, ¿qué formas adopta esta reproducción?

Si entendemos la reproducción de un resultado experimental como la determinación de una misma propiedad (sea esta cuantitativa o cualitativa), entonces, un resultado experimental puede reproducirse:

1- Repitiendo un mismo procedimiento con el equipo original. Dado que permanece constante el instrumento utilizado, llamaremos a este caso *I-repetición*.⁸⁹

2- Utilizando otro equipo diseñado para el mismo fin. En este caso, es posible que el experimento:

2.1- Mantenga constante el diseño experimental del experimento original y el cuerpo teórico presupuesto. Es el caso de la *replicación* de experimentos.

2.2- Varíe en su diseño, en cuyo caso los presupuestos teóricos pueden:

2.2.1- Permanecer constantes. El experimento será del mismo *tipo* que el original. Podemos denominar a este caso de reproducción, *T-repetición*. (El prefijo *T*, indica que lo que permanece constante es el cuerpo teórico presupuesto). En esta forma de reproducción se espera que varíe la sensibilidad del arreglo experimental.

2.2.2- Modificarse. Las teorías presupuestas en el diseño del experimento cambian respecto de las supuestas en el experimento original, con lo que estaríamos frente al caso de la *contrastación independiente*. Podemos señalar, en principio, dos sentidos en los que puede hablarse de contrastación independiente. En un primer sentido, se supone que los experimentos funcionan a partir de procesos físicos causalmente independientes y

⁸⁹ Es preciso distinguir aquí la *I-Repetición* de lo que tradicionalmente se denomina *corrida experimental* (*experimental run*) es decir, de las múltiples mediciones que se realizan en el transcurso de un mismo experimento, que permiten luego del tratamiento estadístico, obtener el resultado.

presuponen teorías lógicamente independientes. En un segundo sentido, que es una versión debilitada de la contrastación independiente, se exige que la reproducción determine propiedades diferentes del objeto que se investiga.⁹⁰ La contrastación independiente, en cualquiera de los sentidos que distinguimos, no puede pensarse como la repetición de un experimento, sino que constituye un nuevo procedimiento experimental con vistas a la reproducción de un cierto resultado previamente obtenido.

Hemos presentado aquí un esbozo de clasificación de los modos de reproducción experimental. Teniendo en cuenta el objetivo primario de este trabajo, no avanzaremos sobre este tema, pero podemos señalar lo siguiente: existen dos grandes grupos de reproducciones, las *repeticiones*, cuya constante es que mantienen el cuerpo teórico que se presupone en el arreglo experimental. Entre ellas agrupamos a la *I-repetición*, la *replicación* y la *T-repetición*. El otro tipo de reproducción es el que llamamos *contrastación independiente*. La serie de formas de reproducción queda bien representada en el caso de la detección de neutrinos solares y en los distintos experimentos que se realizaron para contabilizarlos. Consideremos como el *experimento original* el llamado *Homestake Mine* que condujeron Davis y Bahcall; como *I-repetición*, una nueva toma de datos en el mismo arreglo experimental; como *T-repetición*, *Gallex* y *Sage*. Finalmente, puede pensarse como una *contrastación independiente* el experimento denominado *Sundbury neutrino observatory*. (Para un estudio detallado del *neutrino puzzle* puede consultarse Franklin, 2004).

Por ahora será suficiente con lo dicho acerca de la reproducción experimental.⁹¹ Ahora nos ocuparemos en la elucidación del concepto de *replicación*.

⁹⁰ La posibilidad de contrastación independiente en sentido fuerte, es decir en el sentido de que las teorías supuestas en el diseño experimental sean lógicamente independientes, supone la evaluación previa de un conjunto de tesis respecto de la naturaleza de las teorías científicas que no podemos profundizar en este trabajo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, la independencia que puede establecerse es más débil; en general, los diseños experimentales estudian propiedades diversas de aquello que se intenta medir, por ejemplo, en la medición de la tasa de neutrinos solares, entendemos como una contrastación independiente del experimento original propuesto por Davis, a las mediciones llevadas a cabo en el *Sundbury Neutrino Observatory*. El primer experimento tomó en consideración la interacción débil de los neutrinos, mientras que el segundo, consideró el efecto *Cerenkov*. (Cf. Franklin, 2004).

⁹¹ En trabajos próximos, nuestro objetivo será desarrollar una teoría de la reproducción experimental que avance sobre esta clasificación y que evalúe cada modo de reproducción desde una perspectiva epistemológica.

A.2 La replicación de experimentos y el conocimiento tácito

Según Allan Franklin, dos experimentos son réplicas si se cumple que miden “la misma magnitud física” (Franklin, 1998, p. 155). ¿Qué decir al respecto? Si Franklin quiere llamar réplica a las reproducciones experimentales que miden la misma magnitud física, pues puede hacerlo; pero entonces no estará discutiendo el problema de la replicación de experimentos tal como lo entiende Collins. En efecto, su definición tiene las siguientes consecuencias: en primer lugar, el experimento de Weber que mide voltaje como forma de determinar si existen o no ondas de gravedad, es una réplica de cualquier otro experimento en el que se mida voltaje por cualquier otra razón. Una consecuencia bastante absurda, por cierto. Además, hace colapsar las formas de reproducción que distinguimos en la sección anterior. Todas serían replications, excepto las contrastaciones independientes. Resulta evidente que necesitamos una caracterización un poco más precisa.

Entendemos entonces, y en primer lugar, que no todo experimento requiere la medición de una magnitud, aunque sí la determinación de una propiedad; que la determinación de una misma propiedad, si bien es una condición necesaria para que dos experimentos se consideren réplicas, de ningún modo es una condición suficiente. Tal como se desprende de la clasificación que presentamos, es una condición necesaria para la repetición en general.

Para el caso específico en el que se intenta reproducir un resultado experimental por medio de la replicación de un experimento, sumamos a la exigencia de determinar una misma propiedad, la invariancia tanto del diseño experimental y, por tanto, del cuerpo teórico presupuesto. Entendemos que los tres requisitos son necesarios para considerar que un experimento es una réplica de otro. Sin embargo, no son suficientes dado que es posible que ambos experimentos los cumplan y no sean réplicas más que aparentemente. Intentaremos a continuación contextualizar el problema de la replicación de experimentos, mostrando por qué los requisitos anteriores no bastan para definir este concepto y propondremos una condición adicional que -entendemos- permitirá caracterizar de manera suficiente el concepto en cuestión.

El término *réplica*, si seguimos su uso en las ciencias biomédicas, lleva asociada la connotación de identidad; la replicación es el mecanismo biológico por medio del cual una molécula de *ADN* se copia, dando como producto de dicho proceso otra molécula

idéntica a la primera, es decir, idéntica respecto de sus propiedades moleculares pero numéricamente diferente.⁹² Entendemos que es éste el sentido que se le da al término en los trabajos canónicos de diseño experimental. Por ello, creemos que es esta característica la que debemos privilegiar al momento de definir la noción de replicación para los experimentos en ciencias fácticas, siendo ahora fundamental establecer a qué tipo de identidad estamos aludiendo. Resulta llamativo que los autores que participan en la discusión, asignen significados tan diversos al término *réplica*. Harry Collins enfatiza alguna forma de identidad entre detectores, al punto de considerar que dos instrumentos son réplicas en el caso de ser *isomórficos*. (Collins, 1985, p. 170-171). Asumimos que, para que la discusión sea fructífera, es preciso un acuerdo respecto del significado de los términos utilizados. Sin embargo, ya hemos tenido la oportunidad de conocer la propuesta de Allan Franklin, y, en el caso de Hans Radder, cuando discute el argumento del regreso del experimentador, también da un sentido completamente diferente al término *réplica*. Según su propuesta, dos experimentos son réplicas si reproducen un resultado con independencia del conocimiento teórico presupuesto. (Radder, 1995, p. 66). Sería deseable, tanto filosófica como metodológicamente, establecer un uso canónico de los términos técnicos implicados en la discusión.

Si la replicación de un experimento tiene como objetivo la contrastación de un resultado experimental, y, por tanto, la importancia de la réplica reside en la posibilidad de contrastar los resultados del instrumento original, aquello que resulta necesario y que en conjunción con los requisitos antes mencionados de invariancia teórica e invariancia del diseño experimental caracteriza de manera suficiente a una réplica, es el hecho de que ambos arreglos experimentales sean *funcionalmente idénticos*, es decir, que dada una misma señal emitida por la fuente estudiada, ambos instrumentos proporcionen un dato coincidente dentro del margen de sensibilidad del arreglo experimental. Sin embargo resulta de dudosa utilidad práctica la postulación del requisito de identidad funcional ya que para que el juicio respecto del éxito en la replicación pueda formularse es preciso proponer un *método* para evaluar si dos dispositivos son o no funcionalmente idénticos. A continuación propondremos una posible forma de determinar tal identidad.

La calibración, el uso de una señal sustituta con el objetivo de estandarizar un instrumento (Cf. Franklin, 1998, p. 237), es un recurso fundamental a la hora de evaluar

⁹² El lector sabrá dejar de lado aquí la incidencia de las mutaciones en el proceso de replicación de adn y la importancia que esto tiene en un sentido biológico, especialmente, en un sentido evolutivo.

si un instrumento de medición o de detección funciona apropiadamente. Una característica peculiar del proceso de calibración es que la señal que habitualmente se considera el *output* funciona aquí como el dato conocido que permitirá ajustar el instrumento. Todos los instrumentos utilizados en la práctica científica deben ser periódicamente calibrados ya que esta operación permite eliminar el error de ajuste, un subtipo de error sistemático. Pero, no es sólo en virtud de evitar el error de ajuste que la calibración es relevante antes de la toma de datos, sino también porque un instrumento de medición es un sistema físico y, como tal, se ve afectado por el desgaste de sus partes, lo que a su vez incide en su correcto funcionamiento. Ahora bien, la calibración supone conocer y poder manipular la fuente que se intenta investigar. Dado que en la investigación de frontera generalmente es imposible satisfacer este requisito, la calibración del instrumento se realiza postulando una similitud entre la fuente a investigar y otra señal ya conocida (como, por ejemplo, la calibración de las antenas de tipo Weber con pulsos de energía acústica que mencionamos en el capítulo cinco). Sin embargo, que el detector pueda captar adecuadamente la señal sustituta no nos autoriza a afirmar que detecta adecuadamente la señal desconocida, dado que la proposición que afirma la similitud entre señales podría ser falsa. Pero si bien no es posible apelar a esta estrategia como medio para juzgar el buen funcionamiento de un instrumento, la calibración puede resultar un medio útil para determinar si un detector es o no una réplica adecuada del original, permitiendo conjeturar la identidad funcional entre los instrumentos sometidos a comparación. En este caso, la calibración adoptará la forma de una *calibración múltiple*. Si los detectores son expuestos a distintos tipos de señales ambos detectores proveen *outputs* coincidentes para cada *input* de cada tipo de señal,⁹³ podemos inferir de manera inductiva que para aquella señal desconocida se comportarán de igual modo. Asimismo, podremos inferir que la transmisión de conocimiento tácito ha sido exitosa. Permítanme representar esto al modo de un argumento inductivo para dejar más claro a qué me refiero con la calibración múltiple como estrategia para evaluar si hay o no una replicación exitosa:

- 1- A y B son sometidos al estímulo de tipo W [en una magnitud n] y proporcionan un *output* coincidente.

⁹³ La idea básica es la siguiente: en muchas oportunidades, los detectores permiten detectar más de un tipo de señal. Por ejemplo, en el caso de las antenas de Weber, se pueden estimular con energía eléctrica, sísmica, acústica, etc. Introducir inputs conocidos de cada una de estas formas de energía y evaluar si ambos detectores la registran de igual modo, nos permitiría conjeturar que también se comportarán de una manera semejante para la señal desconocida.

- 2- A y B son sometidos al estímulo de tipo X [en una magnitud n] y proporcionan un *output* coincidente.
 - 3- A y B son sometidos al estímulo de tipo Y [en una magnitud n] y proporcionan un *output* coincidente.
 - 4- A y B son sometidos al estímulo de tipo Z [en una magnitud n] y proporcionan un *output* coincidente.
- // A y B al ser sometidos al estímulo desconocido V [en una magnitud desconocida n], proporcionarán un *output* coincidente.

Si se cumple lo anterior, entonces, se puede conjeturar que A y B son funcionalmente idénticos, y por lo tanto, réplicas. Si este es el caso, se puede conjeturar que el conocimiento tácito ha sido adecuadamente transferido entre equipos de investigación.⁹⁴ Con lo cual, la tesis 5, que denominamos *tesis de la inincidencia del conocimiento tácito y de la indetectabilidad de su transferencia* en la reconstrucción del AREr presentamos en el capítulo siete, es falsa.

Ejemplificando lo anterior a partir del caso que hemos estudiado en el capítulo cinco, podemos decir, *mutatis mutandis*, que el detector utilizado por Weber y aquel utilizado por Garwin, podrían considerarse funcionalmente idénticos si siendo sometidos a una fuente de pulsos acústicos de intensidad conocida fuesen ambos capaces de registrar el mismo valor para los pulsos, y si al ser excitados por una fuente electrostática común, respondiesen de igual modo.⁹⁵

La calibración múltiple como modo de evaluación de la identidad funcional, condición necesaria para que dos experimentos sean réplicas, no es inmune a la crítica,⁹⁶ pero provee un recurso útil en el momento de juzgar la transmisión exitosa de conocimiento tácito.

⁹⁴ Nótese aquí algo fundamental en mi argumento. Es preciso distinguir la posibilidad de juzgar que dos instrumentos son réplicas a la posibilidad de juzgar que son buenos detectores de X. En este punto, mi argumento sólo busca establecer la posibilidad de lo primero. La calibración múltiple permite con las limitaciones propias de la ciencias naturales, establecer si dos instrumentos son funcionalmente idénticos, no permite mostrar que sean, además, buenos detectores.

⁹⁵ Esto es meramente ilustrativo. No sostenemos que efectivamente las antenas de ambos investigadores sean réplicas, por cuanto difieren en su sensibilidad. Contrariamente a lo que sostiene Franklin (1998), creemos que esos experimentos son *T-repeticiones*.

⁹⁶ Si bien consideramos que la identidad funcional es una condición necesaria y, conjuntamente con las anteriores, suficiente para que dos instrumentos sean réplicas, dado que su determinación se logra apelando a procedimientos empíricos, la postulación de la identidad funcional es, como toda proposición de carácter fáctico, conjetural. No obstante, la calibración múltiple aporta buenas razones para aceptar que dos instrumentos son réplicas.

A.3 ¿Hemos sobrestimado la replicación?

El regreso del experimentador fue discutido en extenso tanto por epistemólogos y sociólogos de la ciencia, como por científicos. Entre las diversas respuestas es particularmente interesante la que proporciona Allan Franklin en sus trabajos (Cf. Franklin, 1998, 1999 y 2002). Podríamos pensar que su crítica es básicamente de carácter histórico, ya que se ocupa con detalle del análisis del caso de las ondas de gravedad para mostrar cómo la comunidad científica, al rechazar los resultados de Weber, utilizó criterios racionales. Según su investigación, Weber cometió una serie de errores en el transcurso de sus experimentos que disminuyeron la credibilidad de los resultados obtenidos. Como indicamos en el capítulo cinco, la coincidencia de pulsos entre los dos detectores era una consecuencia de un error en la sincronización, la correlación sideral propuesta era espuria, la elección de la técnica para el procesamiento de las vibraciones en el instrumento no era adecuada, el umbral a partir del cual un pulso se consideraba una onda de gravedad se variaba en función de los datos obtenidos, los detectores no eran calibrados, el aumento de la sensibilidad del detector no generó una modificación de la proporción ruido-sígnal. Finalmente, no hubo corroboración por parte de otros grupos de investigación independientes entre sí. Y si bien considero que el aporte de Franklin es sumamente valioso, entiendo que resulta conveniente, cuando ello resulta posible, ir más allá de lo particular, tratando de mostrar, en general, porque AREr no se sigue. Por ello, a continuación, buscaremos mostrar que la tesis 4, es decir, la replicación como único modo legítimo de disconfirmación, es falsa.⁹⁷

En la sección anterior propusimos un método para determinar si un instrumento o arreglo experimental es o no una réplica de otro. Ahora bien, si dos instrumentos son réplicas, ofrecerán para los mismos *inputs*, los mismos *outputs* (con independencia de que estos *outputs* sean correctos), exceptuando en dos tipos de situaciones:

- 1) Mal uso de alguno de los equipos.
- 2) Señales anisotrópicas y réplicas alejadas.

⁹⁷ En el capítulo siete afirmamos que (4) era una consecuencia de (1), (2) y (3). Si mostramos que es falsa, también al menos una de las premisas de las que se sigue debe serlo. Mi hipótesis es que tanto (2) como (3) son falsas, pero no voy a mostrarlo aquí. La otra opción es que yo esté equivocada y que (4) no se siga de las premisas anteriores. En cualquier caso, (4) es un elemento importante en el argumento del regreso del experimentador en la replicación y mostrar su falsedad resulta útil al momento de mostrar las debilidades de dicho argumento.

Si se aplica el método de calibración múltiple, ambos grupos de experimentadores aprenden a operar el arreglo experimental conjuntamente. Eso vuelve muy improbable que uno de los equipos, de modo sistemático, cometa errores que alteren los resultados. Desde luego, habrá errores de carácter humano, pero se espera que estos se diluyan en el pool de *datos* obtenidos y, no hay razones para pensar que un equipo de investigación deba equivocarse más que el otro, de modo que los errores en la manipulación de los equipos y en las tomas de *datos* se repartirán y se compensarán en ambos grupos. Con ello, la conclusión a la que llego, si bien llamativa, no por eso menos atendible, es la siguiente: la replicación, cuando es bien entendida, no posee propiedades disconfirmatorias.

En efecto, teniendo en cuenta nuestra caracterización del concepto de replicación y tomando seriamente las exigencias de Collins, llegamos a la paradójica consecuencia de que, si las réplicas son tales, confirmarán inevitablemente los resultados previos. Con ello, asumimos que la replicación de experimentos, lejos de ser como Collins pretendiera, el único medio epistemológicamente aceptable para la reproducción de un resultado experimental, no permite dirimir el estatus de un resultado conflictivo.⁹⁸ Llegamos entonces a la conclusión de que el problema no reside en las dificultades de la replicación, algo que es consistente con la historia del caso que hemos presentado en el capítulo cinco. Por el contrario, el problema reside en cómo determinar qué propiedades posee una señal que es poco conocida, un aspecto que cobra especial relevancia en la investigación de frontera. Esto es, el regreso del experimentador en la replicación, paradójicamente, no es un problema acerca de la replicación de experimentos, sino de cómo determinar cuál es el resultado correcto, es decir, un problema relacionado con la tesis (7) y, por lo tanto, con *AREg*. Y hemos ofrecido una salida alternativa a la que Collins propusiera para *AREg*, de carácter interno, en el capítulo ocho de este trabajo.

Para finalizar, me gustaría motivar un poco más la idea de que la replicación carece de virtudes contrastativas. Para ello, acudiré a la historia de las ciencias. Difícilmente dos equipos de investigación repliquen experimentos, por el contrario, la norma en la práctica científica es la variación de los procedimientos experimentales, que en general tienen como consecuencia un aumento de la sensibilidad de los instrumentos de medición respecto del experimento original, y que según nuestra clasificación son casos

⁹⁸ Franklin y Howson (1984) sostienen a partir del enfoque *bayesiano* al problema, que la replicación de experimentos posee escaso valor confirmatorio cuando es comparada con otros procedimientos para la reproducción de resultados. Coincidimos con ellos agregando que la replicación experimental, por sus características, tampoco permitirá la disconfirmación.

de *t-repeticiones*. Un ejemplo que es comparable a los intentos de detección de ondas de gravedad (tanto por la polémica que generó en la comunidad física, como por las dificultades del experimento) es el de la posibilidad de inducir reacciones nucleares a bajas temperaturas: la *fusión en frío*. En este episodio, Martin Fleischmann y Stanley Pons afirmaron haber logrado la fusión nuclear a partir de átomos de deuterio.⁹⁹ Al tiempo, intentando reproducir los resultados de Fleischmann, Abriola y su equipo construyeron un dispositivo 25 veces más sensible con el que no encontraron evidencia alguna de la emisión de neutrones a 2.5 MeV -el resultado informado por Fleischmann y Pons- (Cf. McKinney, 1998). Encontramos aquí otro ejemplo de un caso conflictivo en el que, lejos de replicar el experimento sometido a evaluación, se busca reproducir el resultado apelando a instrumentos mucho más sofisticados y sensibles.

Hay, sin embargo, casos de experimentos replicados pero su objetivo no es ni la confirmación ni la disconfirmación de un resultado previo, sino que consisten en repeticiones de interés histórico por cuanto están destinadas a evaluar si un científico realizó o no cierto procedimiento, si un experimento pudo haber dado o no cierto resultado. Como ejemplo, podemos pensar en las repeticiones de los experimentos de Galileo que llevaron a cabo de manera independiente Stillman Drake (1973), Ronald Naylor (1980) y David Hill (1988) o, tomando un artículo reciente sobre el tema, en la replicación del *kaliapparat* de Justus Von Liebig, instrumento destinado al análisis de sustancias orgánicas. (Usselman, Reinhart y Foulser, 2005).

⁹⁹ La fusión nuclear es un proceso que tiene como resultado una liberación extraordinaria de energía, y de poder lograrse a bajas temperaturas tendría un impacto económico de extrema importancia.

Bibliografía

- Ackermann, R. (1985), *Data, Instruments and Theory: A Dialectical Approach to Understanding Science*, Princeton: Princeton University Press.
- Ackerman, R. (1989) “The New Experimentalism”, *British Journal for the Philosophy of Science*, **40**: 185-190.
- Amaldi, E. (1980) “Einstein and Gravitational Radiation”, en: Edwards, C. (Ed.) *Gravitational Radiation, Collapsed Objects and Exact Solutions*, Berlin: Springer-Verlag. (pp. 246-298).
- Arabatzis, T. (1996) “The Discovery of the Zeeman Effect: A Case Study of the Interplay Between Theory and Experiment”, *Studies in History and Philosophy of Science*, **23**: 365-388.
- Arabatzis, T. (2008) “Experiment”, en: Curd, M. (Ed.) *The Routledge Companion to Philosophy of Science*, New York: Routledge. (pp. 159-170).
- Aristóteles, *De Sensu*. [*Sense and Sensibilia*, en: Barnes, J. (Ed.), *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation*, Vol I, pp. 1729-1867, Princeton University Press, Princeton, 1984, Translated by Ross, W.D. With Revision by Urmson, J.O.]
- Bacon, F. (1620) *Novum Organon*, Ed. Peter Urbach & John Gibson, Chicago, Open Court, 1994.
- Bahcall, J. (1969) “Neutrinos From the Sun”, *Scientific American*, **221**: 29-37.
- Bahcall, J. y Davis, R. (1976), “Solar Neutrinos: A Scientific Puzzle”, *Science*, **191**: 264-267.
- Baird, D. (1988) *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Baird, D. (2004) *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*. Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press.
- Bandyopadhyay, P. (1972) “Solar Neutrinos and the Cl Neutrino Absorption Experiment”, *Journal of Physics*, **A5**: L19-L23.
- Barnes, J. (1990) *The Toils of Scepticism*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Beekman, I. (1634) *Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634*, publié avec une introduction et des notes par C. de Waard, La Haye: Nijoff, 4 vols. (1939).
- Bernard, C. (1865) *Introduction a l'étude de la médecine expérimentale*. Paris: Flammarion.
- Blair, D. (1991) (Ed.) *The Detection of Gravitational Waves*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Blair, D. (1991) "Gravitational Waves in General Relativity", en Blair, D. (1991), (Ed.). *The Detection of Gravitational Waves*. (pp. 3-15.)
- Blair, D. (1991) "Sources of Gravitational Waves", en Blair, D. (1991), (Ed.) *The Detection of Gravitational Waves*. Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 16-42).
- Blair, D.; McClelland, D.; Bachor, H.; and Sandeman, R. (1991) "Gravitational Wave Detectors", en Blair, D. (1991), (Ed.) *The Detection of Gravitational Waves*. Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 43-49).
- Bogen, J. (2002) "Experiment and Observation", en: Machamer, P. y Silberstein, M. *The Blackwell Guide to the Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell Publishers. (pp. 128-148).
- Boyer, C. (1941) "Early Estimates of the Velocity of Light", *Isis*, **33**. 1: 24-40.
- Brown, H. (1987) *Observation and Objectivity*. New York: Oxford University Press.
- Brown, H. (2010) *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in Natural Sciences*. London: Routledge. (1a ed. 1991).
- Buchwald, J. (Ed.), (1995) *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Buchwald, J. y Franklin, A. (Eds.), (2005) *Wrong for the Right Reasons*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Bunge, M. (1967) *Scientific Research*, New York: Springer Verlag, 2 vols. [Traducción al castellano: *La investigación científica*, Barcelona: Ariel, 1980.]
- Carnap, R. (1966) *Philosophical Foundations of Physics*. New York: Basic Books. [Traducción al castellano: *Fundamentación lógica de la física*. Buenos Aires: Hyspamérica, 1985.]
- Carnap, R.; Hahn H.; y Neurath, O. (1929) "Wissenschaftliche Weltauffassung. Der Wiener Kreis", Viena: Wolf. [Traducción al castellano de Pablo Lorenzano: "La concepción científica del mundo: el círculo de Viena", *Redes*, **9**, 18: 103-149 (2002).]

- Carnap, R., Neurath, O. y Morris, Ch. (Eds.), (1938) *International Encyclopedia of Unified Science*. Vol. I, Chicago: University of Chicago Press.
- Carrier, M. (1998) “New Experimentalism and the Changing Significance of Experiments: On the Shortcomings of an Equipment-Centered Guide to History”, en Heidelberger, M. and Steinle, F. (1998), (Eds.). *Experimental Essays- Versuche zum Experiment*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft. (pp. 175-192).
- Carter, W. y Carter, M. (2002) “The Newcomb-Michelson's Velocity of Light Experiments”, *EOS, Transactions American Geophysical Union*, **83-37**: 405-410.
- Cartwright, N. (1991) “Replicability, Reproducibility and Robustness: Comments on Harry Collins”, *History of Political Economy* , **21**: 143-155.
- Cartwright, N.; Cat, J.; y Uebel, T. (1996) *Otto Neurath: Philosophy between Science and Politics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cassini, A. (2001) *El lado empírico de la ciencia: observación, experimentación y realidad en las ciencias naturales*, inédito.
- Cassini, A. y Levinas, M. (2009) “El éter relativista: un cambio conceptual inconcluso” *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, **41-123**: 3-38.
- Cohen, B. y Smith, G. (Eds.) (2004) *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Collins, H. (1975) “The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of Experiments in Physics”, *Sociology*, **9**: 205-224.
- Collins, H. (1981) “Son of the Seven Sexes: The Social Destruction of a Physical Phenomenon”, *Social Studies of Science*, **11**:1, 33-62.
- Collins, H. (1983) “An Empirical Relativist Programme in the Sociology of Scientific Knowledge”, en Knorr-Cetina, K y Mulkay, M. (1983) *Science Observed, Perspectives on the Social Studies of Science*. London: Sage. (pp. 85-113).
- Collins, H. (1984) “When do Scientists Prefer to Vary their Experiments”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, **15**: 169-174.
- Collins, H. (1991) “The Meaning of Replication and the Science of Economics” *History of Political Economy*, **21**: 123-142.

- Collins, H. (1992) *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Second Edition, Chicago: University of Chicago Press. (1a ed. 1985).
- Collins, H. (1994) “A Strong Confirmation of the Experimenters’ Regress”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **25** (3): 493-503.
- Collins, H. (2001) “Tacit Knowledge, Trust and the Q of Sapphire”, *Social Studies of Science*, **31**: 71-85.
- Collins, H. (2004) *Gravity’s Shadow: The Search for Gravitational Waves*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Collins, H. (2010) *Tacit and Explicit Knowledge*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Collins, H. (2011) *Gravity’s Ghost: Scientific Discovery in the Twenty First Century*. Chicago: University of Chicago Press.
- Collins, H. y Pinch, T. (1993) *The Golem: What You Should Know About Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Colodny, R. (Ed.), (1977) *Logic, Laws and Life*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Cornu, A. (1872), “Nouvelle determinacion de la vitesse de la lumiere”, en *Recueil de travaux et discours d’A. Cornu parus de 1863 à 1904*, Vol 2, pp. 241-289, Paris: Université Pierre et Marie Curie.
- Culp, S. (1995) “Objectivity in Experimental Enquiry: Breaking Data-Technique Circles”, *Philosophy of Science*, **62**: 430-450.
- Danston, L. y Park. K. (Eds.), (2008) *The Cambridge History of Science*, Vol III, Cambridge: Cambridge University Press.
- Davies, P. (1980) *The Search for Gravity Waves*. Cambridge: Cambridge University Press.
[Traducción al castellano: *En busca de las ondas de gravitación*. Barcelona: Salvat.]
- Davis, R. (2002) “A Half-Century with Solar Neutrinos”, Nobel Lecture.
- de Ronde, C. (2011) *The Contextual and Modal Character of Quantum Mechanics*. The Netherlands: Print Partners Ipskamp.

- Descartes, R. (1637) *Dioptrica*, en Descartes, *The World and Other Writings*, Stephen Gaukroger (Ed.), Cambridge Texts in the History of Philosophy. Cambridge: Cambridge University Press.
- Descartes, R. *Oeuvres*, Adam, C. and Tannery, P. (Eds.). Paris, 1897-1913. 13 Vols.
- de Waard, Cornelis. (1935) “Le manuscrit perdu de Snellius sur la réfraction”, *Janus*, **39**: 51-75.
- Díez Calzada, J. (2002) “A Program for the Individuation of Scientific Concepts”, *Synthese*, **130**: 13-48.
- Díez Calzada, J. y Moulines, U. (2008) *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Tercera edición, Barcelona: Ariel.
- Dingler, H. (1928) *Das Experiment, sein Wesen und seine Geschichte*. München: Reinhardt.
- Drake, S. (1973) “Galileo’s Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts”, *Isis*, **64**: 291-305.
- Duhem, P. (1914) *La Théorie Physique: son objet, sa structure*. Paris: M. Rivière, (1a ed. 1906).
- Edwards, C. (1980), (Ed.) *Gravitational Radiation, Collapsed Objects, Exact Solutions*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ferreirós, J. y Ordoñez, J. (2002) “Hacia una filosofía de la experimentación”, *Crítica*, **34**: 102, 47-86.
- Feyerabend, P. (1958) “An Attempt at a Realistic Interpretation of Experience”, en Feyerabend, P. (1981) *Realism, Rationalism and Scientific Method: Philosophical Papers, Volume 1*. Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 17-36).
- Feyerabend, P. (1981) *Realism, Rationalism and Scientific Method: Philosophical Papers, Volume 1*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fizeau, H. (1849), “Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière”, *Comptes Rendus*, Academie des Sciences de Paris, **29**: 90-92.
- Franklin, A. (1986) *The Neglect of Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Franklin, A. (1988) “It Probably is a Valid Experimental Result: A Bayesian Approach to the Epistemology of Experiment”, *Studies in History and Philosophy of Science*, **19**: 419-427.

- Franklin, A. (1989), "The Epistemology of Experiment", en Gooding, D.; Pinch, T. y Schaffer, S. (1989), (Eds.) *The Uses of Experiment*, Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 437-460).
- Franklin, A. (1990) *Experiment: Right or Wrong?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Franklin, A. (1998) "Avoiding the Experimenters' Regress", en Koertge, N. (Ed.), *A House Built on Sand: Exposing Postmodernist Myths about Science*. Oxford: Oxford University Press. (pp. 151-165).
- Franklin, A. (1999) *Can That Be Right? Essays on Experiments, Evidence and Science*. Dordrecht, Boston and London: Kluwer Academic Publishers.
- Franklin, A. (2002) *Selectivity and Discord: Two Problems of Experiments*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Franklin, A. (2004) *Are There Really Neutrinos? An Evidential History*. Cambridge: WestView Press.
- Franklin, A. (2005) *No Easy Answers: Science and the Pursuit of Knowledge*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Franklin, A. y Howson, C. (1984) "Why Do Scientists Prefer to Vary their Experiments?" *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, **6**:141-184.
- Franklin, L. (2005), "Exploratory Experiments", *Philosophy of Science*, **72**: 888-899.
- Foucault L. (1878), *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, ed. par Gariel C.-M., Gauthier-Villars, Paris, Reéd. Librairie Albert Blanchard, (2001).
- Galavotti, M. (Ed.), (2003) *Observation and Experiment in the Natural and Social Sciences*. Boston: Springer.
- Galileo. (1638) *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*. Buenos Aires: Editorial Losada (2003).
- Galison, P. (1987) *How Experiments End*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Galison, P. (1995) "Context and Constraints", en Butchwald, J. (Ed.) *Scientific Practice, Theories and Stories of Doing Physics*. Chicago: University of Chicago Press. (Pp. 13-41).
- Galison, P. (1997) *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.

- Garwin, R. y Levine, J. (1974) "New Negative Results for Gravitational Wave Detection and Comparison with Reported Detection", *Physical Review Letters*, **33**; 13: 794-797.
- Giere, R. (1988) *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Goethe, W. (1792), "The Experiment as a Mediator between Subject and Object", en *Scientific Studies*, edición y traducción a cargo de Douglas Miller. pp. 11-17.
- Godin, B. y Gingrass, Y. (2002) "The Experimenter Regress': from Skepticism to Argumentation", *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, **33**-1: 133-148.
- Gonzalez, W. (Ed.) (2011) *New Methodological Perspectives on Observation and Experimentation in Science*. La Coruña: Netbiblo.
- Gooding, D. (1990) *Experiment and the Making of Meaning: Human Agency in Scientific Observation and Experiment*. Dordrecht, Boston and London: Kluwer Academic Publishers.
- Gooding, D.; Pinch, T. y Schaffer, S. (Eds.) (1989) *The Uses of Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hacking, I. (1983) *Representing and Intervening*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hacking, I. (1989) "Philosophers of Experiment", *Proceedings of the PSA 1988*, **2**: 147-156.
- Hacking, I. (1992) "The Self-Vindication of Laboratory Sciences", en Pickering, A. (Ed.), *Science as Practice and Culture* (pp. 29-64). Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Hacking, I. (1992a) "Do Thought Experiments Have a Life of Their Own?", *Philosophy of Science Association, Proceedings, PSA*, **II**: 302-308.
- Hakfoort, C. (1995) *Optics in the Age of Euler, Conceptions of the Nature of Light: 1700-1795*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanson, N. R. (1958) *Patterns of Discovery: An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanson, N. R. (1967) "An Anatomy of a Discovery", *The Journal of Philosophy* , **64**-11: 321-352.
- Harré, R. (1981) *Great Scientific Experiments: Twenty Experiments that Changed our View of the World*. Dover Publications: New York.

- Harré, R. (2003) "The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments", en Radder, H. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press. (pp. 19-38).
- Heidelberger, M. y Steinle, F. (Eds.), (1998) *Experimental Essays- Versuche zum Experiment*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft.
- Heidelberger, M. (1998) "Die Erweiterung der Wirklichkeit im Experiment", en Heidelberger, M. and Steinle, F. (Eds.), (1998) *Experimental Essays- Versuche zum Experiment*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft. (pp. 93-114).
- Heidelberger, M. (2003) "Theory-Ladenness and Scientific Instruments in Experimentation", en Radder, H. (Ed.), (2003) *The Philosophy of Scientific Experimentation* (pp. 138-151). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Herschel, J. (2009) *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press. (1a ed. 1830).
- Hetch, E. (2000) *Optics*. Pearson Addison Wesley. [Traducción al castellano: *Óptica*. Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.]
- Hill, D. (1988) "Dissecting Trajectories: Galileo's Early Experiments on Projectiles Motion and the Law of Fall", *Isis*, **79**: 646-668.
- Hon, G. (1989) "Franck and Hertz versus Townsend: A Study of Two Types of Experimental Error", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, **20**: 1, 79-106.
- Hon, G. (1995) "Is the Identification of Experimental Error Contextually Dependent? The Case of Kaufmann's Experiment and its Varied Reception", en Buchwald, J. (Ed.), *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics* (pp. 170-223). Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Hon, G. (1998) "'If This Be Error': Probing Experiment With Error", en Heidelberger, M. and Steinle, F. (1998), (Eds.) *Experimental Essays- Versuche zum Experiment*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft. (pp. 227-248).
- Hon, G. (2003) "The Idols of Experiment: Transcending the "etc. List"", en Radder, H. (Ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press. (pp. 174-197).

- Hon, G. (2003a) "An Attempt at a Philosophy of Experiment", en Galavotti, M. (Ed.), (2003). *Observation and Experiment in the Natural and Social Sciences*. Boston: Springer. (pp. 259-284).
- Hon, G. (2009) "Error, the Long Neglect, the One-Sided View and a Typology", en Hon, G.; Schickore, J. y Steinle, F. (Eds.), (2009) *Going Amiss in Experimental Research*. Boston: Springer. (pp. 11-26).
- Hon, G.; Schickore, J. y Steinle, F. (Eds.), (2009) *Going Amiss in Experimental Research*. Boston: Springer.
- Hones, M. (1990) "Reproducibility as a Methodological Imperative in Experimental Research" *Philosophy of Science Association. Proceedings*, **1**: 585-599.
- Horowitz, T. y Massey, G. (Eds.), (1991) *Thought Experiments in Science and Philosophy*. Savage: Rowman and LittleField.
- Hughes, T. (1976) *Science and the Instrument Maker: Michelson, Perry and the Speed of Light*. Washington: Smithsonian Institution Press.
- Huyghens, C. (1690) *Treatise on Light*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Huyghens, C. (1703) *Dioptrica*.
- Jacobs, K. (1975) "Chemistry of the Solar Neutrino Problem", *Nature*, **256**: 560-561.
- Jaffe, B. (1960) *Michelson and the Speed of Light*. New York: Doubleday.
- Knorr-Cetina, K. (1982) "Relativism - What Now?", *Social Studies of Science*, **12**: 133-136.
- Knorr-Cetina, K y Mulkay, M. (1983) *Science Observed, Perspectives on the Social Studies of Science*. London: Sage.
- Koertge, N. (Ed.), (1998) *A House Built on Sand: Exposing Postmodernist Myth about Science*. Oxford: Oxford University Press.
- Koestler, A. (1959) *The Sleepwalkers: A History of Man's Challenging Vision of the Universe*. Middlesex: Pelican Books.
- Kosso, P. (1989) *Observability and Observation in Physical Science*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers.

- Kroes, P. (2003) "Physics, Experiment and the Concept of Nature", en Radder, H. (Ed.), (2003) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press. (pp. 68-86).
- Kuhn, T. (1970) *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press. (1a ed. 1962).
- Kuhn, T. (1977) *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. Chicago: University of Chicago Press.
- Latour, B. y Woolgar, S. (1979) *Laboratory Life: The Social Construction of a Scientific Facts*. Beverly Hills: Sage.
- Laudan, L. (1982) "A Note on Collins' Blend of Relativism and Empiricism", *Social Studies of Science*, **12**: 131-132.
- Leeson, C.; Leeson, T. y Paparo, A. (1988) *Text/Atlas of Histology*, Michigan: Saunders.
- Leibniz, G. (1969) *Leibniz, G. Philosophical Papers and Letters*. Chicago : Chicago University Press.
- Lenoir, T. (1988) "Practice, Reason, Context: The Dialogue Between Theory and Experiment", *Science in Context*, **2**: 1, 3-22.
- Lenzen, V. (1938) "Procedures of Empirical Science", en Carnap, R. Neurath, O.; y Morris, Ch. (Eds.), (1938) *International Encyclopedia of Unified Science*, Vol. I, Chicago, University of Chicago Press, (pp. 279-339).
- Lequeux, J. (2008) *François Arago, un savant génèreux. Physique et astronomie au XIXe siècle*. Paris: EDP Sciences.
- Levine, J. (2002) "Early Gravity-Wave Detection Experiments, 1960-1975", *Physics in Perspective* , **6**: 42-75.
- Livingston Michelson, D. (1973) *The Master of Light: A Biography of Albert A. Michelson*, Chicago and London, University of Chicago Press.
- Lohne, J. (1961) "Newton's "Proof" of the Sine Law and his Mathematical Principles of Colors", *Archive for the History of the Exact Sciences*, **1**: 389-405.
- Lohne, J. (1968) "«Experimentum Crucis» Notes and Records of the Royal Society of London", **23**, 2:169-199.

- Machamer, P. y Silberstein, M. (2002) *The Blackwell Guide to the Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell Publishers.
- Mach, E. (1905) *Erkenntnis und Irrtum: Skizzen zum Psychologie der Forschung*, Leipzig, Barth. [Traducción al francés: *La connaissance et l'erreur*, Paris, Flammarion. 1905].
- Mach, E. (1913) *The Principles of Physical Optics: An Historical and Philosophical Treatment*. New York: Dover Publications. [Traducción al inglés, 1926].
- Mackay, R. y Oldford, R. (2002) "Scientific Method, Statistical Method and the Speed of Light", *Statistical Science*, **15**, 3: 254-278.
- Mancosu, P. (2008) "Acoustics and Optics" en Danston, L. y Park, K. (Eds.) *The Cambridge History of Science*, Vol III, Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 596-631).
- Maudlin, T. (1993) "Buckets of Water and Waves of Space: Why Spacetime is Probably a Substance", *Philosophy of Science*, **60**: 183-203.
- Mayo, D. (1996) *Error and the Growth of Experimental Knowledge*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Mayo, D. y Spanos, A. (Eds.). (2010) *Error and Inference: Recent Exchanges on Experimental Reasoning, Reliability and the Objectivity and Rationality of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- McCulloch, P.; Taylor, J. y Fowler, L. (1980) "Gravitational Radiation and the Binary Pulsar", en Edwards, C. (Ed.), *Gravitational Radiation, Collapsed Objects and Exact Solutions*. Berlin: Springer-Verlag. (pp. 5-11).
- McKinney, W. (1998) "When Experiments Fail: Is "Cold Fusion" Science as Normal?", en Koertge, N. (Ed.), *A House Built on Sand: Exposing Postmodernist Myths about Science*, Oxford, Oxford University Press. (pp. 133-150).
- McLaughlin, P. (1993) "Der neue Experimentalismus in der Wissenschaftstheorie", en Rheinberger, H. and Hagner, M, (Eds.), (1993) *Die Experimentalisierung des Lebens. Experimentalsysteme in den biologischen Wissenschaften*. Berlin: Akademie Verlag. (pp. 207-218).
- Michelson, A. (1880) "Experimental Determination of the Velocity of Light Made at the United States Naval Academy Annapolis", *Astronomical Papers*, **1**: 109-146.
- Michelson, A. (1903) *Light Waves and their Uses*, Chicago: The University of Chicago Press.

- Michelson, A. (1927) "Measurement of the Velocity of Light between Mount Wilson and Mount Saint Antonio", *The Astrophysical Journal*, **65**: 1-14.
- Miller, D. (Ed.), (1995) *Johann Wolfgang von Goethe, Collected Works, Vol 12: Scientific Studies*. New York: Surhkamp Publishers.
- Millikan, R. (1938) "Biographical Memoir of Albert Abraham Michelson", *National Academy of Sciences*, **XIX**, 120-140.
- Montaigne, M. (1588) *Essays*. Vol II. London: Dent J. M [1938-1942].
- Morgan, M. (2003) "Experiment without Material Intervention: Model Experiments, Virtual Experiments, and Virtually Experiments", en Radder, H. (Ed.), (2003), (pp. 216-235).
- Moulines, C. U. (2011) *El desarrollo moderno de la filosofía de la ciencia (1890-2000)*. México: UNAM.
- Nagel, E. (1961) *The Structure of Science*. New York: Harcourt, Brace and World.
- Nagel, E.; Suppes, P. y Tarski, A. (Eds.), (1962) *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*. Stanford: Stanford University Press.
- Naylor, R. (1980) "Galileo's Theory of Projectile Motion", *Isis*, **71**: 550-570.
- Newcomb, S. (1891) "Measures of the Velocity of Light Made Under the Direction of the Secretary of the Navy During the Years 1880-1882", *Astronomical Papers*, **2**: 107-230.
- Newcomb, S. (1903) *The Reminiscences of an Astronomer*. Cambridge: Cambridge Library Collection.
- Newton, I. (1671) "Letter to the Royal Society", *Philosophical Transactions*, **80**: 3075-3087.
- Newton, I. (1704) *Optics*. William Benton Publisher, Chicago-London: Enciclopedia Britannica.
- Norton, J. (2007) *Einstein for Everyone*. Pittsburgh: Nullarbor Press.
- Pickering, A. (1989) "Living in the Material World: On Realism and Experimental Practice", en Gooding, D.; Pinch, T. y Schaffer, S. (Eds.) *The Uses of Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 275-297).
- Pickering, A. (Ed.), (1992) *Science as Practice and Culture*. Chicago and London: The University of Chicago Press.

- Pinch, T. (1993) "Testing, One, Two, Three, Testing!: Towards a Sociology of Testing", *Science, Technology and Values*, **18**: 25-41.
- Plá, C. (1947) *Velocidad de la luz y relatividad*. Buenos Aires: Espasa Calpe.
- Polanyi, M. (1966) *The Tacit Dimension*. Gloucester: Peter Smith.
- Popper, K. (1959) *The Logic of Scientific Discovery*. London and New York: Routledge.
- Radder, H. (1992) "Experimental Reproducibility and the Experimenters' Regress", *Philosophy of Science Association, Proceedings*, **1**: 63-73.
- Radder, H. (1995) "Experimenting in the Natural Sciences: A Philosophical Approach", en Buchwald, J. (Ed.), (1995) *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics*. Chicago and London: The University of Chicago Press. (pp. 56-86).
- Radder, H. (Ed.), (2003) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Radder, H. (2003) "Technology and Theory in Experimental Science", en Radder, H. (Ed.), (2003) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: The University of Pittsburgh Press. (pp. 152-173).
- Radder, H. (2006) *The World Observed / The World Conceived*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Raghavan, R. (1995) "Solar Neutrinos: from Puzzle to Paradox", *Science*, **267**: 45-51.
- Rasmussen, N. (1993) "Facts, Artifacts and Mesosomes: Practicing Epistemology with the Electron Microscope", *Studies in the History of The Philosophy of Science*, **24**: 227-265.
- Rasmussen, N. (2001) "Evolving Scientific Epistemologies and the Artifacts of Empirical Philosophy of Science: A Reply Concerning Mesosomes", *Biology and Philosophy*, **16**: 629-654.
- Ribe, N. y Steinle, F. (2002) "Exploratory Experimentation: Goethe, Land, and Color Theory", *Physics Today*, **55**, 7: 43-49.
- Rheinberger, H. y Hagner, M. (Eds.), (1993) *Die Experimentalisierung des Lebens. Experimentalsysteme in den biologischen Wissenschaften 1850/1950*. Berlin: Akademie Verlag.

- Rheinberger, H. (1997) *Toward a History of Epistemic Things: Synthesizing Proteins in the Test Tube*. Stanford: Stanford University Press.
- Roëmer, O. (1676), “Demonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Roemer de l’academie Royale des Sciences”, *Journal des Savans*, 233-236.
- Rogers, K. (2005) *On the Metaphysics of Experimental Physics*. Great Britain: Palgrave Macmillan.
- Ronchi, V. (1957) *Optics: The Science of Vision*. New York: New York University Press.
- Ronchi, V. (1970) *The Nature of Light*. London: Heineman.
- Sabra, A. (1981) *Theories of Light from Descartes to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Salmon, W. (1984) *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton: Princeton University Press.
- Sakellariadis, S. (1982) “Descartes’ Experimental Proof of the Infinite Velocity of Light and Huyghens Rejoinder”, *Archives for History of Exact Sciences*, **26**: 1, 1.-12.
- Schaffer, S. (1989) “Glass Works: Newton’s Prisms and the Uses of Experiment”, en Gooding, D.; Pinch, T. and Schaffer, S. (Eds.), (1989) *The Uses of Experiment, Studies in the Natural Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press. (pp. 67-104).
- Scheffler, I. (1967) *Science and Subjectivity*. Indianapolis: Bobbs-Merril.
- Schutz, B. (2009) *A First Course in General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shamos, M. (Ed.). (1959) *Great Experiments in Physics: Firsthand Accounts from Galileo to Einstein*. New York: Dover Publications.
- Sepper, D. (1994) *Newton’s Optical Writings*, New Brunswick: Rutgers University Press.
- Sepper, D. (2002) *Goethe contra Newton: Polemics and the Project for a New Science of Color*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shapere, D. (1982) “The Concept of Observation in Science and Philosophy”, *Philosophy of Science*, **49**: 485-525.

- Shimony, A. (1977) "Is Observation Theory-Laden? A Problem in Naturalistic Epistemology", en Colodny, R. (Ed.), (1977) *Logic, Laws and Life*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press. (pp. 185-208).
- Sorensen, R. (1992) *Thought Experiments*. New York: Oxford University Press.
- Steinle, F. (1997) "Entering New Fields: Exploratory Uses of Experimentation", *Philosophy of Science (Proceedings)*, **64**: S65-S74.
- Steinle, F. (2002) "Experiment in History and Philosophy of Science", *Perspectives on Science*, **10**: 408- 432.
- Suppes, P. (1962) "Models of Data" en Nagel, E.; Suppes, P. y Tarski, A. (Eds.), (1962) *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*. Stanford: Stanford University Press. (pp. 252-261).
- Thomas, J. y Vahle, P. (Eds.), (2008) *Neutrino Oscillation: Present Status and Future Plans*. Singapore: World Scientific.
- Thorne, K. (1988) *Gravitational Radiation: A New Window to the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Usselman, M.; Reinhart, C. y Foulser, K. (2005) "Restating Leibig: A Study in the Replication of Experiments", *Annals of Science*, **62**: 1-55.
- Vollgraff, J. (1936) "Snellius' Notes on the Reflection and Refraction of Rays", *Osiris*, **1**: 718-725.
- Weber, J. (1960) "Detection and Generation of Gravitational Waves", *Physical Review*, **117**-1: 306-313.
- Weber, J. (1967) "Gravitational Radiation", *Physical Review Letters*, **18**-13: 498-501.
- Weber, J. (1968a) "Gravitational Radiation from the Pulsars", *Physical Review Letters*, **21**-6: 395-396.
- Weber, J. (1968b) "Gravitational Wave Detector Events", *Physical Review Letters*, **20**-23: 1307-1308.
- Weber, J. (1969) "Evidence for Discovery of Gravitational Radiation", *Physical Review Letters*, **22**-24: 1320-1324.

- Weber, J. (1970) “Anisotropy and Polarization in the Gravitational-Radiation Experiments”, *Physical Review Letters*, **25-3**: 180-184.
- Weber, J. (1972) “Computer Analyses of Gravitational Detector Coincidences”, *Nature*, **240**: 28-30.
- Weckert, J. (1986) “The Theory Ladenness of Observations”, *Studies in History and Philosophy of Science*, **17**:1, 115-127.
- Westfall, R. (1962) “The Development of Newton’s Theory of Color”, *Isis*, **53**: 3, 339-358.
- Wheeler, J. A. (1962) *Geometrodynamics*. New York: Academic Press.
- Will, C. (2006) “*The Confrontation between General Relativity and Experiment*” *Living Reviews in Relativity*. Germany: Albert Einstein Institute. [<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/>]
- Woolgar, S. (1988) *Science, the Very Idea*. London: Tavistock.
- Zuppone, R. (2006) “¿Por Qué Aceptar un Resultado Experimental?”, en Ahumada, J.; Pantalone, M. and Rodríguez, V. (Eds.) *Epistemología e Historia de la Ciencia* (pp. 585-591). Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Zuppone, R. (2010) “El argumento del regreso del experimentador y la replicación de experimentos”, *Scientiae Studia*, **8-2**: 243-271.
- Zuppone, R. (2011) “La vida propia del experimento: un análisis crítico de la autonomía de la experimentación”, *Revista Latinoamericana de Filosofía*, **37**: 213-238.
- Zuppone, R. (2012) “El empirismo lógico en perspectiva: el olvido de Otto Neurath”, *Alcances: Revista de Filosofía Contemporánea*, III. [Publicación electrónica].