

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Humanidades y Artes

Licenciatura en Filosofía

Tesina de Grado. Título:

Un experimento para Riemann.

Introducción a la tesis convencionalista en la física relativista

Estudiante: Matías Daniel Pasqualini

Director: Javier Castro Albano

Codirector: Joel J. Lorenzatti

Rosario, octubre de 2018

Introducción	2
1. La geometría no euclidiana y la física relativista	6
1.1. La nueva geometría	
1.2. La nueva física	
1.2.1. Relatividad especial	
1.2.2. La geometría de Minkowski	
1.2.3. Relatividad general	
2. Desarrollo inicial de la tesis convencionalista	29
2.1. Convencionalismo geométrico de Poincaré	
2.2. Convencionalismo epistémico de Reichenbach	
2.2.1. Definición de congruencia espacial	
2.2.2. Definición de congruencia temporal	
2.2.3. Criterio de simultaneidad estándar	
2.2.4. Criterio de causalidad estándar	
2.2.5. Reconstrucción de la relatividad general	
2.2.6. La topología del espacio-tiempo	
2.2.7. El fundamento filosófico de la física	
3. Convencionalismo en el contexto pospositivista	49
3.1. La tesis Duhem-Quine	
3.2. Convencionalismo fáctico de Grünbaum	
3.3. Convencionalismo trivial de Putnam	
3.4. Intercambio crítico entre convencionalismo trivial y fáctico	
3.5. Hacia un <i>a priori</i> no convencionalista: Friedman	
3.5.1. La vía metodológica	
3.5.2. La teoría del <i>a priori</i> relativizado	
4. Hacia un posicionamiento respecto a la tesis convencionalista	68
4.1. Convencionalismo y empirismo	
4.2. Los principios <i>a priori</i> de la física relativista	
Conclusión	83
Bibliografía	84

Introducción

La tesis convencionalista surgió para explicar el particular carácter que tienen los axiomas geométricos ante el surgimiento de sistemas no euclidianos. Poco después, con ocasión de la aparición de la física relativista, el convencionalismo se convirtió, en el contexto del Círculo de Viena, en una teoría del *a priori* que buscó sustituir a la teoría del *a priori* kantiana. Por medio de esta tesina pretendemos lograr una comprensión de la teoría del *a priori* convencionalista y su aplicación a los principios de la física relativista, evaluando argumentos a favor y en contra. Adicionalmente, buscaremos un posicionamiento propio al respecto.

Debemos hacer rápida referencia en esta introducción a la teoría del *a priori* trascendental de Kant, para luego detenernos con detalle en los capítulos subsiguientes en la teoría del *a priori* convencionalista. Fue Kant quien señaló que los juicios de la matemática y algunos principios de la física son *a priori* sintéticos. Su noción de analiticidad como inhesión del predicado en el sujeto no permitía establecer que tales juicios fueran analíticos como había pretendido Hume. Es sabido que para justificar la posibilidad de disponer de juicios *a priori* sintéticos postuló en su *Estética trascendental* la existencia de dos intuiciones puras, espacio y tiempo, como condiciones de posibilidad de la experiencia. En Kant, el sujeto interviene activamente en la constitución del objeto de conocimiento. Dicha constitución tiene como resultado la posibilidad de una única geometría intuitivamente necesaria, la euclidiana, y de una sola física que habrá de estar por fuerza basada en ella.

A lo largo del siglo XIX fueron apareciendo diversas formas de geometría no euclidianas hasta la generalización de las mismas alcanzada en la teoría de los continuos de Riemann. La existencia de múltiples sistemas geométricos puso en jaque la idea de que los axiomas geométricos fueran autoevidentes como se los había reconocido tradicionalmente. Ante este panorama, el matemático francés Henri Poincaré propuso que los axiomas de la geometría quedan establecidos solamente a partir de una estipulación arbitraria que realizan los geómetras. Por ello mismo, un sistema geométrico no puede ser por sí mismo verdadero o falso. La idea kantiana de una única geometría intuitivamente necesaria comenzaba a resquebrajarse. Sobre finales del mismo siglo Frege propone una nueva lógica, la lógica de relaciones, que será

ulteriormente perfeccionada por Russell y permitirá lograr un análisis de proposiciones que Kant había considerado sintéticas.

Einstein publicará su teoría de la relatividad especial en 1905 y su relatividad general en 1915. La nueva física abandona la tradicional geometría euclidiana en que se basaba la física clásica y adopta la geometría de Riemann. A partir de 1919 la relatividad será aceptada por la comunidad científica en virtud de pruebas empíricas concretas. Este hecho constituyó una verdadera revolución científica con importantes consecuencias filosóficas: lo que parecía ser un constructo convencional que no podría tener aplicación alguna en la realidad (la geometría no euclidiana) se convierte en la base de una nueva teoría física con mayor capacidad de predicción empírica que la física clásica. Einstein parece lograr lo imposible: ofrecer un “experimento” para confirmar empíricamente la geometría de Riemann.

Las anteriores circunstancias confluyen en la génesis del célebre Círculo de Viena, cuyos miembros serán conocidos como los positivistas lógicos. Estos pensadores precisamente se congregan para estudiar más profundamente la nueva física de Einstein y la nueva lógica de relaciones. Encuentran que el trabajo de Einstein tiene más bien un carácter filosófico, ya que interpreta el mismo material empírico con una nueva base conceptual. Se entroncan con la tradición empirista crítica del kantismo que rechaza la posibilidad de juicios sintéticos *a priori*, considerados juicios metafísicos. Sin embargo, estiman que al menos algunos de los principios de la física han de tener carácter necesario y por ello *a priori*. La innovación einsteiniana según ellos consistió precisamente en una reformulación de estos principios *a priori*.

Para fundamentar la posibilidad de juicios *a priori* apelan a la noción de analiticidad. Recién dijimos que Kant no podía aceptar que los principios de la matemática y de la física fueran analíticos porque disponía de una lógica muy primitiva. Los positivistas lógicos pondrán en juego las herramientas de la nueva lógica para desarrollar nociones de analiticidad que expliquen el carácter *a priori* de los principios de las teorías científicas sin apelar a la teoría kantiana del *a priori* sintético. La idea original de Frege de que la verdad analítica puede reducirse a verdad lógica ya no era viable en virtud de las inconsistencias que encontrara Russell en el trabajo de Frege. Por esta razón los positivistas lógicos propondrán nociones de lo analítico basadas en la idea de convención. Lo que están haciendo es tomar la tesis convencionalista que Poincaré

desarrollara para los principios geométricos y la trasladan a todo el dominio de lo *a priori*. En virtud de una serie de estipulaciones meramente lingüísticas, fijando las definiciones de ciertos conceptos centrales, se sientan los principios de una teoría científica de modo convencional.

Para los positivistas lógicos la idea de convención era importante ya que les permitía sostener una noción de analiticidad que a su vez fundamentaba el carácter *a priori* de los principios de una teoría científica evitando especulaciones metafísicas. De alguna manera el trabajo de los positivistas lógicos permite reciclar el proyecto kantiano en el sentido de que el sujeto continúa teniendo parte activa en la constitución del objeto de conocimiento. Pero mientras en el kantismo dicha intervención tenía lugar por medio de dispositivos trascendentales, v. gr. las intuiciones puras, los positivistas lógicos limitan la intervención del sujeto al campo meramente lingüístico. Cuando fijan los principios *a priori* de una teoría de modo convencional, los científicos están construyendo un lenguaje específico para una disciplina científica que permitirá precisamente un tratamiento teórico del material empírico disponible. Mientras que para Kant el fundamento del conocimiento *a priori* era trascendental, es decir, estaba anclado en la estructura epistémica misma del sujeto, para los positivistas lógicos lo *a priori* no será propiamente conocimiento sino la condición de posibilidad del mismo, por medio de la constitución (convencional) de un lenguaje.

Nótese que los positivistas lógicos nos están ofreciendo de este modo una teoría semántica del *a priori*: la verdad *a priori* es tal en virtud del significado. Esta concepción de lo *a priori* tiene la ventaja de permitir entender que los principios de las teorías puedan revisarse y redefinirse, tal como Einstein había hecho con la física clásica. Gracias a su teoría del *a priori* analítico basada en la idea de convención, los positivistas lógicos se ponen en una línea media que pretende a la vez: 1.- rescatar del kantismo la idea de que al menos algunos de los principios de la teorías científicas en general (y de la física en particular) son necesarios; 2.- ser consistente con el empirismo que rechaza la posibilidad de juicios *a priori* sintéticos.

Con dicha teoría del *a priori* en mente, Hans Reichenbach, físico y filósofo cercano al Círculo de Viena, elaboró una cuidada reconstrucción de la física relativista para intentar poner en evidencia que sus principios básicos son *a priori* convencionales porque tienen carácter definicional y coinciden precisamente con los elementos que la

geometría aporta a una teoría física: una estructura topológica y métrica junto con otros presupuestos que permiten establecer una acabada coordinación entre geometría y data empírica. En estos principios creyó encontrar la parte filosófica de la teoría de la relatividad. La obra de Reichenbach *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* de 1927 constituye el paradigma clásico de una interpretación convencionalista de la física relativista, motivo por el cual la estudiaremos en la presente tesina con cierto detenimiento. De acuerdo a la aplicación del enfoque convencionalista en física, los principios *a priori* pueden variar arbitrariamente sin que ello conlleve una alteración en la descripción del mundo físico en términos empíricos. Para ellos no hay experimento para Riemann posible.

Sin embargo, las diferentes nociones de lo analítico que los positivistas lógicos fueron proponiendo encontraron sistemáticamente la crítica de W. V. Quine. En su célebre artículo “Dos Dogmas del Empirismo” de 1950 desarticula las diversas nociones de analiticidad propuestas haciendo muy dificultosa la distinción entre contenidos analíticos y sintéticos al interior de una teoría. Termina ofreciendo una imagen de la ciencia en la cual la interacción entre teoría y data empírica se da de modo holista. Esta forma extrema de empirismo, pondrá en serios problemas la pervivencia de una teoría del *a priori* analítico. En el contexto pospositivista, ya no será tan fácil aspirar a identificar en física ni en ninguna otra disciplina una serie de principios *a priori*.

Dedicaremos un primer capítulo de esta tesina a introducirnos en la geometría no euclidiana y en la física relativista con el objetivo de tener una visión más clara de cuáles son sus principios. En el segundo capítulo presentaremos a los referentes clásicos del convencionalismo. Primero estudiaremos el convencionalismo geométrico de Poincaré y luego el trabajo de Reichenbach, quien traslada el convencionalismo a la física. En el tercer capítulo pasaremos revista de la discusión reciente, que tiene lugar en un contexto ya no positivista, haciendo especial mención de la crítica del convencionalismo ejercida por Quine. Por último, en un cuarto capítulo intentaremos tomar posición en la discusión. Basándonos en el pensamiento de Michael Friedman, argumentaremos que es posible sostener una teoría no convencionalista del *a priori* que prescinda de la noción de analiticidad y que de ese modo escape a la crítica quineana. Entendemos que dicha teoría del *a priori* es la que mejor se ajusta a la naturaleza de los principios de la física relativista. Se trata de la teoría del *a priori* relativizado que Friedman presenta en su *Dynamics of Reason* de 2001.

Capítulo 1. La geometría no euclidiana y la física relativista

En este primer capítulo me propongo presentar al lector aquellos elementos de geometría no euclidiana y de física relativista que resultarán imprescindibles tener presentes. Evitaremos precisiones que no dominamos y que sólo interesarían a profesionales de dichas disciplinas. Nuestro interés al presentar estas teorías es de orden filosófico. Por ello mismo no discutimos la parte técnica de las mismas sino que pretendemos obtener una imagen de conjunto de ellas en atención al objetivo de esta tesina.

1.1. La nueva geometría

Secularmente el irregular estatus del quinto postulado euclidiano perturbó a los matemáticos. Recordemos su formulación: “si una recta al incidir sobre dos rectas hace los ángulos internos del mismo lado menores que dos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se encontrarán en el lado en el que están los (ángulos) menores que dos rectos” (Euclides 1991, pp. 197-198). A diferencia de los primeros cuatro postulados, este último no parecía tener el mismo grado de evidencia. Compárese la complejidad del quinto con la simplicidad de, por ejemplo, los dos primeros. El primero afirma simplemente que entre un punto y otro se puede trazar una recta. Y el segundo que un segmento de recta puede prolongarse indefinidamente. Por ello mismo, el objetivo de varias generaciones de matemáticos fue deducir el quinto de los primeros cuatro, a modo de teorema. Pero cada vez que lo intentaban fracasaban porque se descubrían asumiendo otros principios que eran equivalentes al quinto. Así, Playfair llegó a la siguiente formulación equivalente: por un punto exterior a una recta pasa una sola paralela. En adelante utilizaremos esta formulación en lugar de la original euclidiana. Luego nos detendremos a mostrar de modo intuitivo la equivalencia de ambas formulaciones. No nos interesa aquí reconstruir una historia completa del surgimiento de las geometrías no euclidianas, nos limitaremos a señalar algunos hitos y profundizar algunos aspectos de interés en función de la problemática tratada.

El punto de inflexión tuvo lugar en el siglo XVIII con el trabajo del italiano Gerolamo Saccheri (Bonola 1912, p. 22-44). A diferencia de sus predecesores, la estrategia de este matemático para quitar al quinto de la lista de postulados fue intentar demostrarlo como

teorema por medio de una reducción al absurdo. Es decir, considerarlo falso por hipótesis y deducir una contradicción de la conjunción de la negación del quinto postulado y de los primeros cuatro. La dificultad que encontró este autor en arribar a la deseada contradicción abrió eventualmente la posibilidad de desarrollar geometrías consistentes a partir de la sustitución del célebre postulado de las paralelas.

En el siglo XIX y de forma independiente, dos autores publican la primera alternativa no euclidiana de geometría. Se tratan del ruso Nicolai Lobatschewsky y del húngaro Johann Bolyai (Bonola 1912, p. 84-113). La geometría por ellos propuesta recibe el nombre de geometría “hiperbólica” y, en lugar del quinto euclidiano, depende del siguiente postulado: por un punto exterior a una recta pasa más de una paralela. Algunas décadas después, el alemán Bernhard Riemann logró un enfoque de la geometría más general que el de sus predecesores (Carnap 1985, p. 125; Torretti 1984, pp. 82-85). Entre sus variantes posibles se encuentra la misma geometría euclidiana, la geometría hiperbólica de Bolyai-Lobatschewsky y una geometría llamada “elíptica” que depende de la siguiente alternativa al quinto postulado euclidiano: por un punto exterior a una recta no pasan paralelas.

Tendremos ahora que detenernos en ciertos aspectos de las mencionadas geometrías no euclidianas. Para visualizar el contraste entre estas geometrías y la tradicional euclidiana recordemos los siguientes teoremas de la geometría euclidiana: 1) la sumatoria de los ángulos internos de un triángulo es igual a dos rectos; 2) el cociente entre la circunferencia y su diámetro es igual a π . Correspondientemente, en la geometría hiperbólica la sumatoria de los ángulos internos de un triángulo es menor a dos rectos mientras que en la elíptica es mayor. Asimismo, en la geometría hiperbólica el cociente entre la circunferencia y su diámetro es mayor que π mientras que en la elíptica es menor (Carnap 1985, p. 117). Por otro lado, el célebre teorema de Pitágoras de la geometría euclidiana no se puede deducir de los postulados de las geometrías no euclidianas: los catetos guardan relaciones diferentes con su hipotenusa.

¿A qué se deben estas divergencias? Sencillamente, a que cada una de estas geometrías está dotada de una “métrica” diferente. Sin pretensión de rigor matemático, y sólo con fines expositivos, podemos definir la métrica como aquel aspecto de la geometría que

permite realizar mediciones en el espacio.¹ La geometría euclidiana tiene una métrica tal que las distancias se conservan cuando se trasladan de una región a otra del espacio. Así, la distancia entre dos puntos que resulta de la intersección de una perpendicular que se alza sobre una recta y su paralela, se conserva en la medida en que este segmento imaginario se desplaza a lo largo de las paralelas (si se mantiene ortogonal respecto de ellas). Una métrica definida de tal modo, hace precisamente que por un punto exterior a una recta pase una sola paralela, condición establecida por el quinto postulado euclidiano. Sólo si las distancias se conservan, habrá de satisfacerse la formulación original del geómetra griego: si una recta al incidir sobre dos rectas hace los ángulos internos del mismo lado menores que dos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se encontrarán en el lado en el que están los (ángulos) menores que dos rectos. Si las distancias no se conservaran las rectas podrían cortarse eventualmente en ambos lados o en ninguno de ellos, cosa que comportaría un cambio de geometría. Ahora puede comprenderse la equivalencia de las dos formulaciones del quinto postulado que mencionábamos anteriormente.

¿Qué ocurre si las distancias no se conservan? Si las distancias se expanden cuando nos trasladamos de una región del espacio a otra estamos en el caso de las geometrías hiperbólicas. De acuerdo a los diferentes grados posibles en que una distancia puede expandirse a medida que se traslada en el espacio, tendremos infinitas variantes dentro de la familia de las geometrías hiperbólicas. Si la distancia entre una recta y su paralela no se conserva sino que se expande, hay lugar para más de una paralela, dado que son posibles infinitos “ritmos” de expansión de aquella distancia. Por tanto, en una geometría hiperbólica no solamente pasa más de una paralela por un punto exterior a una recta, sino un número infinito de ellas. Contrariamente, si asumimos que las distancias se contraen, damos lugar a una geometría elíptica. Bajo esta circunstancia, como el lector bien puede representarse, es imposible que pase una paralela por un punto exterior a una recta: cuando las rectas alcancen longitudes infinitas habrán necesariamente de intersectarse dado que sus distancias relativas tienden a contraerse.

Una manera equivalente de diferenciar a la geometría euclidiana de sus alternativas es representarnos los planos de las geometrías no euclidianas como superficies en el espacio tridimensional euclidiano. De esa manera, podemos visualizar que los planos de

¹ Para una definición rigurosa del concepto de métrica remitimos al lector a Friedman 1983, pp. 353-358; Callahan 2000, pp. 203-207; Torretti 1984, pp. 90-103.

las geometrías no euclidianas adquieren “curvatura”. Si la curvatura de la superficie es positiva, es decir, si se repliega sobre sí misma de modo que una recta inscrita en él queda representada como una elipse, estamos ante una geometría elíptica. El caso más simple es el de la geometría esférica. En ella, la curvatura es constante en todas las direcciones y un plano en ella puede representarse como una esfera en el espacio tridimensional euclidiano. La línea recta en una geometría esférica es cualquier círculo máximo de la misma. En general, en una geometría no euclidiana las rectas son las geodésicas de un modelo euclidiano del plano no euclidiano. De aquí que puede considerarse a la recta euclidiana como un caso límite de geodésica.² Alternativamente, si la curvatura es tal que la superficie se abre indefinidamente y una recta queda representada en ella por una hipérbola, estamos ante una geometría hiperbólica. No obstante, son posibles infinitas geometrías distintas en la medida en que la “curvatura” de los planos puede variar localmente.

Es importante aclarar que los planos de las geometrías no euclidianas son tan planos como los planos de la geometría euclidiana, es decir, son estrictamente bidimensionales. Se los puede representar como superficies curvas sólo si se los inserta en un espacio tridimensional euclidiano. La diferencia entre una superficie curva en el espacio euclidiano y un plano no euclidiano es que el primero tiene tres dimensiones mientras que el segundo se limita a ser una superficie bidimensional, tal y como un plano euclidiano. El recurso a representarnos los planos no euclidianos como superficies curvas en el espacio euclidiano no debe inducirnos al error de creer que los planos no euclidianos tienen tres dimensiones. Si pudiéramos visualizarlos en el espacio tridimensional no euclidiano no percibiríamos en ellos curvatura alguna, sólo podríamos reconocer sus peculiares relaciones métricas entre sus puntos. Asimismo, no debemos dejarnos engañar por el modelo euclidiano de los planos y las rectas de las geometrías elípticas: se extienden también indefinidamente como los planos y las rectas de las geometrías hiperbólica y euclidiana. Sólo bajo un modelo euclidiano parecen tener una extensión finita. Las rectas de un plano no euclidiano satisfacen la noción de recta como distancia más corta entre dos puntos. Son tan rectas como las rectas de los planos euclidianos: una recta no euclidiana no puede “tomar un atajo” por una tercera dimensión fuera del plano bidimensional en el cual está inserta.

² Para obtener una definición del concepto de geodésica consultar Callahan 2000, pp. 268-275.

La sustitución del quinto postulado euclidiano por sus alternativas posibles permitió el desarrollo de diversas geometrías igualmente consistentes donde todas las nociones geométricas se satisfacen de la misma manera. Las pruebas de consistencia de las geometrías no euclidianas se consiguieron precisamente reduciendo los sistemas no euclidianos al euclidiano por medio de modelos. Este procedimiento permitió mostrar que las geometrías no euclidianas son tan consistentes como la euclidiana. En el capítulo siguiente mencionaremos el trabajo de Poincaré al respecto. La existencia de una pluralidad de geometrías nos lleva entonces a considerar el particularísimo lugar que el quinto postulado, en cualquiera de sus tres variantes, desempeña en geometría. Dados los conceptos básicos de línea, ángulo y superficie, el quinto postulado precisamente determina a qué subclase de líneas se les considerará rectas, a qué subclase de ángulos se les considerará rectos y a qué subclase de superficies se les considerará planos. Lo que equivale a establecer una métrica determinada. Como bien puede colegirse del desarrollo histórico de la geometría, dicha determinación, que parecía estar necesariamente conectada con los cuatro primeros postulados, resultó independiente de los mismos. La posibilidad de la variabilidad de una métrica parece residir en que la “rectilinealidad” (permítaseme el neologismo) queda determinada exclusivamente en virtud de definiciones recíprocas internas de una geometría.

Considérese lo siguiente: queremos construir una línea recta y disponemos de un segmento de recta materializado en una regla física y de un ángulo recto materializado en una escuadra. Trazamos en nuestro plano, materializado en una hoja de papel muy extensa, un tramo de la recta sirviéndonos de la regla. En un extremo del segmento que hemos trazado apoyamos la escuadra y levantamos una perpendicular. Apoyamos ahora la escuadra sobre la perpendicular y posicionamos la regla contra la escuadra de modo de trazar un nuevo tramo de la recta. Podemos repetir este proceso indefinidamente para prolongar la recta todo lo que quisiéramos. Si pretendiéramos asegurarnos que la rectilinealidad quede garantizada dentro de cada tramo que hemos trazado, deberíamos replicar el procedimiento a escala infinitesimal.

Nótese que la posibilidad de construir una línea recta depende enteramente de tener materializado un ángulo recto en una escuadra. Al mismo tiempo, si no dispusiéramos de una escuadra, no tendríamos otro recurso que apelar a una línea recta para construir un ángulo recto. Una manera de realizarlo puede ser la siguiente. Sobre la recta señalamos dos puntos cualesquiera, apoyamos el compás en cada uno de ellos y

trazamos dos arcos que se intersecten de uno y del otro lado de la recta. Unimos los dos puntos de intersección con un segmento de recta y obtenemos cuatro ángulos rectos.

Si no dispusiéramos ni de un ángulo recto ni de una línea recta, no tendríamos otro remedio que utilizar escuadras aproximadamente rectas y reglas aproximadamente rectas, controlar recíprocamente unas con otras hasta minimizar el error. Pero por esta vía nunca alcanzaríamos la rectilinealidad geométrica, sino sólo una aproximación física eventualmente muy ajustada. Dicho sea de paso, esto es lo que realmente hacemos en el mundo, ya que no existe una línea recta natural aislada de todo efecto distorsivo (o al menos nunca podemos estar ciertos de que ése sea el caso). Definir un ángulo recto supone conocer qué es una línea recta, y definir una línea recta supone conocer qué es un ángulo recto.

Cabe ahora preguntarse qué procedimiento podríamos emplear para determinar la “rectilinealidad” de una superficie, es decir, si una superficie es o no un plano. Evidentemente, esto no puede realizarse sin haber definido la línea recta y el ángulo recto previamente. Debemos trazar una serie de paralelas usando nuestra regla y escuadra y luego una serie de paralelas perpendiculares respecto de la primera serie. Por último utilizar la escuadra para medir si todos los ángulos que han quedado determinados son rectos. Si así resultara, podemos considerar que la superficie, al menos en la región estudiada, es aproximadamente plana. Si queremos estar ciertos, deberíamos repetir el procedimiento a escala infinitesimal.

¿Qué conclusión deberíamos sacar si encontráramos que a medida en que nos alejamos del segmento de recta original que habíamos trazado encontramos que los ángulos determinados por aquella malla conformada por series paralelas difieren del ángulo recto? Podemos sacar dos conclusiones diferentes. Euclides nos diría que la superficie sobre la que trazamos las series de paralelas no es una superficie plana sino una superficie con curvatura no nula. Por ello mismo, aquella superficie posee una estructura interna tridimensional. Las líneas aparentemente rectas que se han trazado sobre ella no son tales, dado que se curvan en una tercera dimensión. Eso explica por qué los ángulos difieren del ángulo recto. Riemann, aunque admitiría como posible la conclusión de su venerable antecesor, propondría que es igualmente concebible que dicha superficie sea realmente un plano bidimensional y que sus rectas sean realmente rectas, sólo que en el contexto de una geometría diferente a la euclidiana. Si como

resultado de la medición de nuestros ángulos constatáramos que las paralelas tienden a converger, deberíamos reconocer que el plano en cuestión pertenece a una geometría elíptica. Si por el contrario obtenemos que las paralelas comienzan a divergir, quedamos obligados a reconocer que estamos ante un plano perteneciente a una de las geometrías de la familia hiperbólica. También es cierto que existen otras infinitas posibilidades: parte del plano puede ser elíptico y otra parte hiperbólico.

Repárese entonces que el quinto postulado, supuesta la definición de rectilinealidad en cuanto relación recíproca entre la línea recta y el ángulo recto, lo que hace precisamente es dotar de una métrica determinada a los planos de su geometría. A la vez, se da que sólo estableciendo una métrica queda determinado qué subclase de líneas y de ángulos habrán de ser rectos: hasta ese momento cualesquiera subclases de líneas y ángulos podrían considerarse rectos en la medida en que la definición de rectilinealidad es una relación recíproca interna entre líneas y ángulos. Asimismo, las diferentes posibles alternativas del quinto postulado proponen métricas diversas. Sostener que por un punto exterior a una recta pasa una sola paralela es equivalente a decir que puede construirse una malla de cuadriláteros a partir de dos series de rectas paralelas una perpendicular a la otra y que todos los ángulos de aquellos cuadriláteros serán rectos. Es decir, es definir una métrica euclidiana para el plano de esta geometría. Contrariamente, sostener que por un punto exterior a una recta pasan infinitas paralelas es equivalente a decir que si construimos la mentada malla encontraremos que la suma de los ángulos internos de aquellos cuadriláteros no alcanzará a los cuatro rectos. Es decir, es definir una métrica hiperbólica para el plano. Por último, sostener que por un punto exterior a una recta no pasan paralelas es lo mismo que decir que en aquella malla la suma de los ángulos internos de los cuadriláteros supera los cuatro rectos. Es decir, se establece una métrica elíptica para el plano, con lo que el plano se pliega sobre sí mismo cuando las rectas alcanzan extensión infinita.

Quizás ahora puede verse con mayor claridad por qué en una geometría no euclidiana la sumatoria de los ángulos internos del triángulo difiere de dos rectos. Divídase los cuadriláteros que hemos propuesto anteriormente en dos triángulos determinados por su diagonal. Encontraremos que los cuadriláteros de la métrica hiperbólica, cuyos ángulos internos suman menos que cuatro rectos, dan lugar a dos triángulos cuyos ángulos internos habrán de sumar menos que dos rectos. Alternativamente, los cuadriláteros de la métrica elíptica, cuyos ángulos internos sumaban más de cuatro rectos, darán lugar a

dos triángulos cuyos ángulos internos superan, al ser sumados, los dos rectos. Con esto también se puso en evidencia porqué Pitágoras no se cumple fuera de la geometría euclidiana. También puede visualizarse porqué la relación de la circunferencia con su diámetro difiere de π : el diámetro debe recorrer una superficie que bajo un modelo euclidiano tiene una estructura interna tridimensional.

Recién ahora puede también aclararse mejor qué quisimos decir anteriormente cuando hablamos de la contracción o expansión de las distancias en una u otra geometría. Estos términos deben tomarse por metáforas mientras nos mantengamos en el ámbito de la geometría. Sólo los objetos físicos se expanden o contraen. Las distancias geométricas en realidad se mantienen siempre, bajo cualquier geometría, una vez establecida una métrica por la adopción de uno de los posibles quintos postulados. Los segmentos de recta determinados por aquellas mallas que hemos construido sobre los planos de las diferentes geometrías, si le asignamos una cantidad numérica, v. gr. “1”, mantendrá esa cantidad en todos los casos. Ya que precisamente, la posibilidad de vincular segmentos de recta con cantidades numéricas depende de una métrica previamente asignada. Parece que las distancias de un plano elíptico se contraen o las de uno hiperbólico se expanden sólo si los juzgamos desde la óptica de una métrica euclidiana. Si hacemos mediciones desde la métrica interna dada en una geometría, las distancias se mantienen iguales. Dotar de una métrica a una geometría es entonces más precisamente definir qué distancias serán consideradas iguales a la hora de realizar mediciones, es decir, es disponer de un criterio de congruencia entre segmentos.

Nótese que la variabilidad del criterio de congruencia, y con ello la de la métrica de una geometría, depende de que el espacio sea concebido como un continuo de puntos inextensos y por ello infinitamente denso. Dado que tanto en un segmento de recta como en una recta completa existe la misma cantidad infinita de puntos, es posible concebir de diversos modos qué distancias serán consideradas iguales. La naturaleza misma del espacio geométrico, como continuo de puntos inextensos, no nos brinda elemento alguno que determine un único criterio de congruencia. Tampoco podemos comparar longitudes respectivas de distintos segmentos en términos de mayor o menor. Si así fuera, el quinto postulado, el que establece la métrica, podría ser deducido de los otros cuatro. La métrica de la geometría queda indeterminada en la estructura más íntima del espacio geométrico. No ocurre lo mismo con las magnitudes discretas. La distancia entre un elemento y otro de este tipo de conjuntos es de suyo mensurable, ya

que entre un elemento y otro ha de haber un número finito de elementos. Piénsese en el conjunto de los números naturales como ejemplo. La estructura interna de este tipo de conjuntos incluye de suyo una “métrica”: los números se pueden contar, los puntos del espacio no.

De lo anterior se desprende que existen infinitas métricas posibles para la geometría. El quinto postulado euclidiano determina un solo elemento de ese conjunto. Las dos alternativas del postulado encierran dentro de ellas infinitas variantes. Se debe a Riemann un tratamiento analítico exhaustivo de la métrica de la geometría, retomando trabajos previos de Gauss sobre la curvatura interna de las superficies. Antes de Gauss no se había ideado otro modo de calcular la curvatura de una superficie sino por medio de una proyección de la misma en un plano exterior a ella. Sin este aporte de Gauss no se podría haber analizado los planos no euclidianos como superficies bidimensionales y sin embargo con “curvatura” (Torretti 1984, pp. 71-82). Se hubiera caído inexorablemente en el análisis de un plano no euclidiano bajo un modelo tridimensional euclidiano. No hubiera permitido reconocer la métrica propia de los planos no euclidianos. Riemann logró asignar una cantidad numérica para dar cuenta del grado de “curvatura” de un plano en una geometría no euclidiana. Precisamente, la geometría euclidiana es aquel especialísimo caso en el cual los planos tienen curvatura igual a cero. Más aún, se debe a Riemann una generalización tan basta de la geometría que incluso estudia la posibilidad de geometrías euclidianas o no euclidianas con más de tres dimensiones. Este recurso analítico será de vital importancia para el desarrollo de la física relativista, que trabajará con una geometría cuatridimensional.

Si la métrica de una geometría resulta variable dadas las nociones básicas de punto, línea y superficie, ¿qué queda de la geometría si la privamos de una métrica? En otros términos, ¿qué estructura queda determinada exclusivamente por los cuatro primeros postulados, prescindiendo de un quinto, ya del euclidiano o de sus posibles alternativas? Esta pregunta no tenía sentido antes del surgimiento de las geometrías no euclidianas, ya que parecía que ésta necesariamente habría de incluir una métrica determinada, la euclidiana. Pues bien, la respuesta que han dado los matemáticos a esta pregunta es la siguiente: la estructura geométrica remanente cuando se hace abstracción de la métrica es la base de una topología. La topología entonces es aquella estructura que queda determinada sólo por relaciones de vecindad entre los puntos. Si bien es cierto que la estructura completa de una topología, por razones que estudiaremos enseguida, queda

determinada sólo cuando se añade una métrica por medio de un quinto postulado, la posibilidad misma de distinguir entre una estructura topológica y otra métrica surge con la aparición de las alternativas no euclidianas.

Sin pretensión de definir exhaustivamente las condiciones que determinan una topología, podemos decir que una vez dada es viable distinguir si un punto está o no entre otros dos. Es decir, en una estructura topológica tenemos puntos, líneas y superficies, pero no tenemos un criterio de congruencia entre segmentos que nos permita considerarlos iguales. No hay métrica, no podemos realizar mediciones y por tanto no podemos determinar si una línea es una recta, si un ángulo es recto o si una superficie es un plano. Dados dos puntos cualesquiera, a partir de ellos podemos trazar una línea y determinar entre los puntos de la línea relaciones de “estar entre” entre dos puntos cualesquiera de ella. Podemos desplazar la línea en cualquier sentido posible y generar distintos tipos de superficie. Como veremos posteriormente, la topología del plano, del espacio tridimensional e incluso de una estructura geométrica cuatridimensional reviste una particular importancia en física. Por ahora repárese solamente en el siguiente ejemplo:

Estamos habituados a pensar que un mapa representa en un plano la estructura interna de los puntos de una superficie aproximadamente esférica como la superficie de la tierra. Análogamente, también podríamos pensar en la posibilidad de mapear en un plano euclidiano un plano esférico no euclidiano. Pero bien pronto caemos en la cuenta que la estructura de un plano no queda fielmente representada en el otro: no solamente queda distorsionada la métrica, sino también su topología. Piénsese cómo la proyección de Mercator exagera las distancias en la medida en que se representan en el plano distancias cercanas a los polos terrestres. También queda distorsionada la topología de una superficie esférica euclidiana o de un plano esférico no euclidiano cuando se lo quiere mapear en un plano euclidiano. Y esto se pone en evidencia cuando se considera que puntos que son vecinos en la estructura original no lo son en su representación. Por ejemplo, el mapa respeta la topología cuando muestra que es posible desplazarse desde Alaska a Siberia; pero traiciona la topología original cuando muestra que es imposible desplazarse del hemisferio occidental al oriental pasando por alguno de los polos. Más aún, la topología del mapa no puede representar la particular situación topológica de los polos terrestres. Los polos no aparecen en los mapas.

Por último, debe reconocerse que si bien es cierto que la métrica es de suyo independiente de la topología, una topología determinada admite sólo ciertas métricas. Por esta razón dejamos sentado anteriormente que prescindiendo del quinto postulado tenemos las bases pero no una estructura topológica completa. Es correcto decir que una cierta topología impone ciertas restricciones a la métrica que pueda añadirse. O equivalentemente: un cierto conjunto de métricas supone una determinada configuración topológica. De aquí que dada una estructura topológica, la determinación de una métrica está constreñida a cierto rango. Por ejemplo, una topología elíptica admite métricas variables pero siempre de curvatura positiva. Del mismo modo, una topología hiperbólica admitirá únicamente métricas de curvatura negativa. La topología misma entraña ciertas condiciones métricas.

1.2. La nueva física

1.2.1. Relatividad especial

La nueva física propuesta por Einstein a partir de 1905 cuando publica su relatividad especial tiene una serie de antecedentes que dan cuenta de su génesis. Ya desde hacía algunas décadas una nueva generación de físicos empezaron a percibir que la física clásica hacía uso de recursos teóricos que no estaban plenamente justificados desde un punto de vista epistemológico. Pionero en esta crítica al paradigma clásico fue el físico y filósofo Ernst Mach, héroe intelectual del posterior Círculo de Viena. Este autor percibía resabios metafísicos, no compatibles con un enfoque positivista de la ciencia, particularmente en el concepto newtoniano de espacio absoluto (Mach 1943, pp. 139-140). Otros autores de la misma generación se esforzaron en redefinir conceptos clásicos dentro de un paradigma netamente empirista, con el objetivo de expurgarlos de todo contenido no directamente observable. Así, se buscaron nuevas definiciones para masa, fuerza, etc. (Moulines 1979, pp. 40-46).

Paralelamente, se venía desarrollando otra rama de la física: la teoría electromagnética. Oersted logró unificar los anteriores conocimientos independientes sobre electricidad y magnetismo bajo una misma teoría. Maxwell encontraría las ecuaciones del campo electromagnético y subsumiría a la teoría el fenómeno lumínico considerado como oscilaciones del campo electromagnético, dando así lugar a una teoría que no responde

al paradigma mecanicista impuesto por la cinemática y la dinámica clásicas. El recurso teórico central de esta teoría es el de “campo”, contrapuesto al concepto de “cuerpo rígido” del mecanicismo clásico. El concepto de “éter” venía a intentar compatibilizar la nueva teoría del electromagnetismo con el mecanicismo clásico, ya que el éter representa una materialización del campo electromagnético y el medio físico por el cual las ondas electromagnéticas se transmiten. Al mismo tiempo, el éter en reposo funcionaba como una materialización del espacio absoluto.

Pero bien pronto se pusieron en evidencia las dificultades de esta amalgama. Un célebre experimento realizado en 1887 por Michelson y Morley con el objetivo de detectar el movimiento relativo de la Tierra respecto del éter en reposo no arrojó los resultados esperados. Si la luz en cuanto onda electromagnética se propaga por medio del éter, y si la Tierra tiene un movimiento relativo respecto del éter, es esperable que la velocidad de la luz resulte alterada para un observador terrestre en la dirección en la que se desplaza la Tierra a través del sutil éter en reposo. No obstante, el experimento no pudo dar cuenta de alteración alguna: la velocidad de la luz resultaba exactamente la misma en el sentido del desplazamiento de la tierra y en el sentido perpendicular al mismo. Lorentz propuso una hipótesis *ad hoc* para salvar la mencionada amalgama: las reglas se contraen respecto del éter en reposo cuando adquieren cierta velocidad y los relojes se retrasan bajo la misma circunstancia. Incluso halló las ecuaciones que determinan el grado de la contracción. Esta hipótesis explicaba por qué la medición de la velocidad de la luz resultaba exactamente la misma aunque el observador se desplace a través del medio por el cual la luz es transmitida. Esta extraña propiedad del éter, exactamente ajustada para hacerlo inobservable en experimento alguno, resultó altamente sospechosa para las mentes más críticas que percibían una incompatibilidad más de fondo entre el reciente electromagnetismo y los presupuestos de la física clásica (Jammer 1994, p. 144).

Aquí es donde entra en escena Einstein con su teoría de la relatividad en 1905, posteriormente llamada “especial”, una vez que se publica la llamada “general”. Recordemos que Galileo había propuesto que no todo movimiento aparente es un movimiento físico real (Feyerabend 1984, p. 59). Algunos movimientos son exclusivamente resultado del cambio de perspectiva del observador. Solo los movimientos que son independientes del punto de vista del observador responden a leyes de la naturaleza. Así, mientras que para un observador A un cierto objeto se

mueve a 20 km/h, para un observador B que se mueve en la misma dirección a 20 km/h el mismo objeto estará en reposo. Los movimientos a velocidad constante y los sistemas de referencia que se mueven a velocidad constante serán considerados inerciales. Las magnitudes propias de un movimiento inercial, la velocidad, posición y tiempo de un móvil no son absolutas sino relativas a un sistema de referencia inercial. Se trata del principio de relatividad de Galileo. Así, Galileo propuso un sistema de ecuaciones para transformar velocidad, posición y tiempo de un móvil a sus equivalentes en un sistema inercial alternativo. Son las transformaciones de Galileo.

Por otro lado, el fenómeno del movimiento acelerado no era considerado movimiento inercial porque su magnitud es la misma en cualquier sistema de referencia inercial. Recordemos que la aceleración es la diferencia de velocidad por unidad de tiempo. Un movimiento no inercial requiere de una fuerza que desvíe al móvil de su trayectoria inercial, haciéndole cambiar su dirección o la magnitud de su velocidad. Se trata de un fenómeno independiente del punto de vista del observador y responde a un hecho físico. Así como la primera ley de Newton establecía cuáles son los movimientos inerciales, la segunda ley establece las condiciones en que se realizan los movimientos acelerados, poniendo en igualdad a la fuerza con el producto de la aceleración y la masa de un cuerpo. El fenómeno del movimiento acelerado sugiere la existencia de un espacio físico absoluto respecto del cual se producen los cambios de velocidades. De hecho, para acelerar un móvil se requiere una inversión de energía, mientras que para mantener la velocidad constante de un móvil no es necesario gasto energético alguno. De haber un espacio absoluto es pensable que los móviles tengan también velocidades absolutas y no solamente relativas a un sistema de referencia inercial.

Hasta la aparición del electromagnetismo y del tratamiento teórico de la luz como una onda, no parecía que fuera empíricamente decidible cuál sistema inercial es el que está en reposo (el que permitiría medir las velocidades absolutas de los móviles). Tampoco interesaba una determinación tal, ya que para medir las aceleraciones un sistema en reposo o en movimiento constante eran perfectamente equivalentes. Cuando se intenta compatibilizar la teoría del electromagnetismo con la física clásica el sistema inercial en reposo adquiere un estatus privilegiado frente a los fenómenos electromagnéticos: recuérdese que se suponía que la luz se propagaba por el éter en reposo absoluto. Sin embargo, si el principio de relatividad de Galileo es universalmente válido, no debía resultar lo mismo realizar una medición de la velocidad de la luz si el sistema está en

reposo o está en movimiento constante. Parecía que se hacía concebible la posibilidad de deducir una consecuencia observable del espacio absoluto newtoniano.³ El experimento de Michelson-Morley, de arrojar los resultados esperados, hubiera constituido una corroboración del principio newtoniano de espacio absoluto. Sin embargo, el resultado del experimento fue desconcertante: parecía implicar que los fenómenos electromagnéticos escapaban al principio de relatividad de Galileo. Este hecho catalizó un completo rediseño de la teoría física.

Ante el dato experimental arrojado por Michelson-Morley cabían en principio dos opciones: 1.- prescindir del principio de relatividad de Galileo; 2.- construir una hipótesis *ad hoc* para explicar por qué la constancia de la velocidad de la luz no es una ley de la naturaleza, independiente del estado de movimiento del observador (Einstein 1920, p. 13). La salida de Einstein fue superadora: extendió el principio de relatividad de Galileo a los fenómenos electromagnéticos y asumió la constancia de la velocidad de la luz como una ley de la naturaleza, como un hecho físico objetivo. Para lograr las dos cosas simultáneamente debió sustituir las transformaciones de Galileo por las transformaciones de Lorentz. Einstein salvó el principio de relatividad de Galileo y lo extendió al electromagnetismo precisamente abandonando las transformaciones de Galileo. Esto significa que las transformaciones de Lorentz se aplican no solamente para las reglas y relojes respecto del supuesto éter en reposo, sino para todas las reglas y relojes en general. Pero esto supone un cambio significativo en los conceptos de espacio y tiempo. Si se analizan las transformaciones de Lorentz, puede verse que las variables tiempo y posición quedan recíprocamente ajustadas. El tiempo ya no será una dimensión independiente del espacio sino que el espacio-tiempo será un continuo cuatridimensional. La geometría apropiada a la relatividad especial será desarrollada posteriormente por Minkowski. Nos ocuparemos de ella en la sección siguiente.

En la física clásica, las longitudes y duraciones se mantienen las mismas en cualquier sistema de referencia inercial. Son magnitudes absolutas. En la relatividad especial, longitudes y duraciones revelan plenamente su condición de mediciones. Dado que el tiempo resulta afectado por el estado de movimiento en el espacio del sistema de

³ En esta declaración estamos omitiendo el experimento del “balde de agua” de Newton que pretende mostrar la necesidad de un espacio absoluto como causa de la aparición de fuerzas centrífugas en un cuerpo físico en rotación respecto de él. Haremos referencia a él un poco más adelante cuando tratemos la relatividad general.

referencia, eventos que son simultáneos en un sistema no lo serán en el otro. Tomar la medida de una longitud supone medir la distancia entre dos eventos considerados simultáneos. Esto tendrá como resultado que la longitud de un cuerpo en un sistema no será la misma que en otro. ¿Pero en qué medida las longitudes y las duraciones resultan afectadas por el estado de movimiento del sistema de referencia? Precisamente, en la medida en que dichas mediciones arrojen un resultado constante para la velocidad de la luz, que es el único absoluto que ha de reconocerse para los sistemas inerciales. Las longitudes y los tiempos están en función de mantener constante la medición de la velocidad de la luz.

Dicho sea de paso, estos efectos casi no son observables cuando los sistemas de referencia se desplazan a velocidades bajas respecto de la velocidad de la luz. Pero cuando un sistema de referencia alcanza porciones significativas de la velocidad de la luz, las distorsiones (que no son tales) se tornan patentes. Imagínese que uno se desplaza a un noventa por ciento de la velocidad de la luz. Igualmente este observador verá que la luz se desplaza respecto de él a la velocidad acostumbrada. Grande tiene que ser la “distorsión” de las longitudes y las duraciones para que este observador encuentre que la luz se desplaza a dicha velocidad. Precisamente, las transformaciones de Lorentz expresan con la necesaria precisión matemática el grado en que se verifican estas “contracciones” y “dilaciones”.

Como puede observarse, la innovación einsteiniana no consistió en encontrar nuevo material empírico, ni en formular hipótesis complementarias a un cuerpo teórico ya consolidado. Lo que Einstein hizo fue interpretar de una manera original los resultados ya conocidos. Habiendo dado cuenta de ciertas dificultades que tenía la teoría vigente hasta el momento (las cuales, por otra parte, no habían logrado de momento refutar el mecanicismo clásico) decidió emprender una labor de reestructuración de los principios de la teoría física para lograr una mejor armonización entre estos principios y el material empírico disponible en el momento. La relatividad especial sustituye la simultaneidad absoluta de la física clásica por un nuevo absoluto: la constancia de la velocidad de la luz. En la relatividad especial espacio y tiempo son todavía independientes de la realidad física (para una relativización completa del espacio-tiempo habremos de esperar a la relatividad general). Sin embargo, poner en relación recíproca las tres dimensiones espaciales con la única temporal fue un paso decisivo en el proceso de

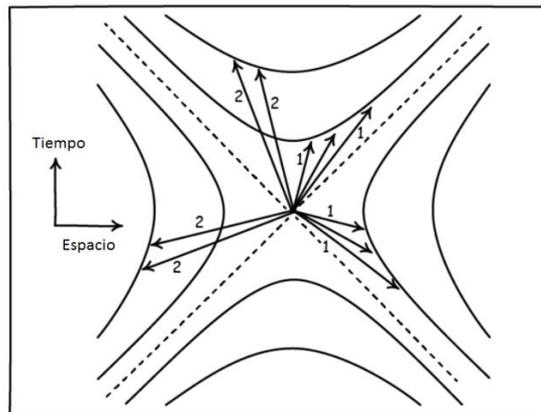
abandono del espacio y tiempo absolutos clásicos. A saber, la simultaneidad y con ellas las longitudes y duraciones ya no serán absolutas.

Además, de la relatividad especial Einstein dedujo nuevas relaciones entre magnitudes físicas como la masa, la energía y la velocidad de la luz. La célebre fórmula $E=mc^2$ permite entender que la velocidad de un móvil siempre puede aproximarse un poco más a la velocidad de la luz pero nunca llegar a ella porque en dichas condiciones tanto su masa como la cantidad de energía para continuar acelerándolo se tornarían infinitas. Esto nos muestra que el hecho de que la velocidad de la luz sea constante y limitada y que ningún cuerpo pueda superar esa velocidad no es asumido por la relatividad especial como una simple casualidad empírica sino como una ley de la naturaleza. Esto quiere decir que Einstein concibe precisamente el espacio-tiempo de la relatividad especial de modo tal de que lo anterior se verifique de modo necesario. Esto se interpreta de la siguiente manera: en la relatividad especial hay un límite máximo para la velocidad de propagación de la cadena de causas y efectos, coincidente con la velocidad de la luz. Un evento en el espacio-tiempo determina a sus contiguos con una velocidad limitada a causa de la estructura misma del espacio-tiempo. En la física clásica un móvil podía desplazarse sin límite en el espacio porque el espacio estaba desconectado del tiempo. En la relativista la conexión del espacio con el tiempo impone un límite a la cantidad de espacio que el móvil puede recorrer por unidad de tiempo. Pero estas consideraciones resultarán intuitivamente más accesibles en la próxima sección.

1.2.2. La geometría de Minkowski

Las enormes dificultades que comporta representarse visualmente la teoría de la relatividad especial fueron aliviadas por una propuesta de quien fuera profesor de matemática del mismo Einstein, Hermann Minkowski. Mientras Einstein había trabajado en términos analíticos, este autor propuso para la misma teoría un sencillo esquema bidimensional (aunque también podría generalizarse a uno de tres o cuatro dimensiones) donde se coordina una dimensión espacial y el tiempo. Se trata del célebre espacio-tiempo de Minkowski, que permite una visualización geométrica de las contracciones de las longitudes y las dilaciones de las duraciones en función de la velocidad de la luz constante para cualquier marco inercial. Estos quedan representados

en el espacio-tiempo de Minkowski y para cada uno de ellos la velocidad de la luz es la misma. En el esquema, pueden observarse en líneas de trazos los rayos de luz que llegan desde el pasado al evento que ocupa el lugar central del esquema y que representa el instante cero para cualquier sistema inercial. Asimismo, desde este evento central se emiten los rayos de luz que se proyectan en el espacio-tiempo futuro. La pendiente de los rayos de luz es igual a uno ya que se toma como unidad de distancia aquella que es capaz de recorrer la luz en una unidad de tiempo.⁴



Imaginemos ahora un cuerpo que se desplaza en el tiempo pero no en el espacio y que constituye un sistema de referencia en reposo relativo. La trayectoria de este cuerpo en el espacio-tiempo queda representada en este esquema por una línea vertical. Si a esa misma línea vertical le damos pendiente tanto positiva como negativa, estamos describiendo la trayectoria de un cuerpo a velocidad constante. Todas estas líneas constituyen infinitos posibles sistemas de referencia inerciales. Evidentemente, la pendiente de estas líneas nunca podrá ser menor a uno, dado que por principio ningún cuerpo físico puede superar la velocidad de la luz. Además, si el cuerpo estuviera acelerado la línea adquiriría curvatura. Todas estas posibles líneas son llamadas “líneas tipo-tiempo” ya que describen las trayectorias posibles de un cuerpo físico en el espacio-tiempo. Las “líneas tipo-espacio” son aquellas que tienen pendiente menor a uno y conectan a los eventos bajo posibles relaciones de simultaneidad. De acuerdo al criterio estipulado por Einstein para determinar la simultaneidad, a cada marco inercial corresponde un “plano” de simultaneidad determinado.

⁴ La imagen está tomada de la siguiente página web y editada para sustituir los términos ingleses por castellanos: http://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/spacetime/index.html

Lo interesante del esquema está en las hipérbolas encerradas dentro de la zona de las líneas “tipo-tiempo”: funcionan como las coordenadas temporales en un sistema cartesiano, sólo que están “deformadas” para satisfacer los requerimientos de la relatividad especial. La unidad de tiempo queda representada por la primera hipérbola, las dos unidades por la segunda, y así sucesivamente. Nótese cómo a medida que el marco referencial adquiere velocidad se produce una dilación temporal (es necesario más tiempo para recorrer una distancia que no se ha incrementado en la misma proporción). Si por un imposible el marco referencial alcanzara la velocidad de la luz, en ese caso el tiempo quedaría absolutamente detenido. Un razonamiento análogo se puede hacer con las hipérbolas apropiadas para medir las distancias. Ellas muestran también cómo las distancias se contraen en la medida en que el marco inercial incrementa su velocidad. También, si por un imposible el marco adquiriera la velocidad de la luz, las distancias se reducirían a cero (en ambos casos el cero queda representado por el punto en el infinito en el que las hipérbolas tocarían las líneas de trazos que representan las trayectorias de la luz).

Quizás podemos ofrecer una mejor inteligencia de la geometría del espacio-tiempo de Minkowski de la siguiente manera. Supongamos que, de acuerdo al enfoque clásico, la velocidad de la luz (la velocidad de transmisión causal) fuera infinita. En ese caso las líneas de trazo coincidirían exactamente con el eje del espacio. También, bajo la misma hipótesis, las hipérbolas que constituyen la métrica del tiempo se convertirían en rectas paralelas al eje del espacio. Además, las hipérbolas que indican la métrica del espacio quedarían todas reducidas al único eje de referencia del espacio, con lo cual la simultaneidad queda determinada de modo absoluto, es decir, espacio y tiempo se convierten en los principios absolutos de la física de modo consistente con el enfoque clásico.

Esto nos indica que la geometría del espacio-tiempo de Minkowski es el resultado de poner en relación recíproca espacio y tiempo en función de una velocidad de la luz constante para cualquier sistema de referencia inercial, en plena correspondencia con la relatividad especial. Podemos imaginarnos una transformación de la geometría del espacio y tiempo clásicos en la geometría del espacio-tiempo de la relatividad especial como aquella que haría adquirir pendiente igual a uno a las trayectorias de la luz originalmente coincidentes con el eje del espacio. Dicha transformación distorsionaría

la métrica de los semiplanos superior e inferior y con ellos los ejes horizontales del tiempo se trocarían en las hipérbolas que cortan todas las líneas “tipo-tiempo” posibles.

La geometría del espacio-tiempo de Minkowski nos permite representarnos visualmente que si preferimos tomar como principios de la física una cierta métrica para el espacio y otra independiente para el tiempo, la velocidad de transmisión causal correspondiente habrá de ser infinita. Un móvil podría eventualmente ser acelerado indefinidamente. Será una contingencia meramente empírica no hallar cuerpos con velocidades superiores a la de la luz. Ese fue el camino tomado por Newton. Contrariamente, si elegimos tomar como absoluto la velocidad de transmisión causal, habremos de tratar al espacio-tiempo como un continuo cuatridimensional, lo que supondrá asumir que aquella velocidad es finita. La relatividad empírica de las mediciones espacio-temporales respecto a la velocidad de la luz constante puesta en evidencia por el experimento de Michelson-Morley es compatible con la hipótesis de que la velocidad de la luz representa justamente aquel límite de la naturaleza. Este fue el camino tomado por Einstein.⁵

1.2.3. Relatividad general

La teoría de la relatividad general aparece en 1915 y en este contexto sólo podemos señalar algunos aspectos muy básicos, dada la complejidad de la misma. Primeramente debemos entenderla como un nuevo paso en la relativización de las leyes físicas respecto de los sistemas de referencia. Si la relatividad especial había logrado homologar el tratamiento de todos los marcos inerciales, haciendo que carezca de sentido el supuesto implícito de un marco inercial privilegiado en reposo en función de un espacio y tiempo independientes, lo que la relatividad general pretende es una última relativización de las leyes físicas respecto de los sistemas de referencia para incluir no sólo a los inerciales sino también a los acelerados. Así como la relatividad especial

⁵ Si encontráramos experimentalmente que la velocidad de la luz, aun siendo la máxima conocida, resulta alterada por el estado de movimiento del observador aunque no en la proporción predicha por la física clásica, igualmente llegaríamos a la teoría de la relatividad especial. El fallo en la predicción nos obligaría a un tratamiento del espacio-tiempo como un continuo cuatridimensional si queremos evitar hipótesis *ad hoc* como la de Lorentz. Encontraríamos las mismas ecuaciones y llamaríamos c a la velocidad de la transmisión causal. Sería teóricamente pensable la posibilidad de encontrar cuerpos con velocidades superiores a la de la luz, aunque nunca superiores a c . Pero dado que de hecho la velocidad de la luz es c , su velocidad representa justamente la velocidad de transmisión causal y por ello mismo se identifica con un límite de la naturaleza. Superar ese límite supondría descomponer espacio y tiempo en dos continuos independientes.

logró “relativizar” el fenómeno electromagnético, la relatividad general lograra “relativizar” el fenómeno gravitatorio. Es decir, lo que persigue es una reducción del movimiento gravitacionalmente acelerado (todavía absoluto respecto del espacio-tiempo de la relatividad especial) a movimiento inercial. Con la relatividad general, el fenómeno de la atracción gravitatoria ya no dependerá de una ley física particular (la ley de gravitación newtoniana) sino que quedará relativizado a un marco inercial dado por medio de una conveniente adaptación de la métrica del mismo.

A la generación de físicos anterior se le había hecho odioso tener que lidiar con dos conceptos que no podían ser controlados empíricamente, el espacio y tiempo absolutos. Einstein dio un decisivo golpe a los mismos en la relatividad especial rompiendo la independencia que había entre ellos. Pero aún en la relatividad especial, el espacio-tiempo era independiente de las entidades físicas, ya sea la partícula o el campo electromagnético. Sólo a partir de la relatividad general el espacio-tiempo no tendrá existencia independiente del campo gravitacional o electromagnético. La relatividad general representa la liquidación definitiva del espacio y tiempo absolutos clásicos.

Pero detengámonos en el proceso que llevó a Einstein a una nueva teoría de la gravitación. Comenzó a percibir una anomalía en el modo en que estaban organizados los principios de la teoría gravitatoria. El hecho de que para cada cuerpo la masa inercial (la resistencia que ofrece un cuerpo a ser acelerado) sea exactamente la misma que la masa gravitatoria (la que interviene en el cálculo de la fuerza gravitatoria) le pareció una igualdad que no podía depender pura y exclusivamente de una casualidad empírica, tal y como al enfoque clásico no le quedaba otra posibilidad de entender. Einstein comenzó a sospechar que la igualdad entre masa inercial y gravitatoria debía ser necesaria. Los principios de una teoría de la gravitación debían ser reordenados de manera tal que la masa gravitatoria y la inercial resulten necesariamente equivalentes, es decir, se fusionen en un solo concepto. Esta intuición, reconocerá Einstein en un escrito póstumo, fue la idea más feliz de su vida.

Einstein comenzó a trabajar con un experimento mental que se hizo célebre. Imaginemos un ascensor suspendido en el espacio de la relatividad especial, libre de todo influjo gravitatorio. Una persona dentro de él estará igualmente suspendida en el espacio. Repentinamente, por una acción externa, el ascensor empieza a ser acelerado con la misma aceleración que muestran los cuerpos gravitacionalmente acelerados sobre

la superficie terrestre. La persona que está dentro sentirá que cae hacia el piso del ascensor y podrá ponerse de pie. Esta no puede ver la causa de la aceleración y por tanto no puede discernir en cuál de las dos situaciones está: o cayó bajo el influjo de un campo gravitatorio o el ascensor mismo (el sistema de referencia) se aceleró de modo equivalente. La conclusión que saca Einstein es que si los fenómenos son equivalentes y son empíricamente indiscernibles, es porque deben ser tratados como una misma realidad física y se lo debe definir bajo un solo concepto.

¿Pero realmente ambas situaciones físicas son la misma? ¿No es esperable encontrar ciertos fenómenos aparentes que se producen en el contexto de un sistema no inercial y que no se producirían por efecto de un campo gravitatorio? El observador encerrado en el ascensor, si ve ingresar un rayo de luz por una ventana lateral, y si la aceleración fuera la suficiente, podrá apreciar que el rayo de luz adquiere curvatura. Además, la relatividad especial predice que un reloj situado cerca del piso del ascensor sufrirá una dilatación respecto de un reloj situado más arriba. Por último, y sólo en el contexto de este sistema no inercial, la luz no sólo se curvará sino que disminuirá su velocidad lineal. Esto no constituye una violación de la relatividad especial como algunos quisieron ver ya que la teoría depende de la constancia de la luz para cualquier marco inercial, y aquí estamos tratando con un sistema acelerado. Pues bien, todos estos efectos, si el principio de equivalencia es válido, deberían verificarse también en un campo gravitacional, aunque la teoría clásica no los haya previsto.

Otro elemento que debía ser incluido en una teoría de la gravitación relativista era el principio de Mach. En su crítica del espacio absoluto newtoniano, este autor cuestionó el famoso experimento del balde de agua de Newton (Reichenbach 1957, p. 213). De acuerdo a este experimento, si se hace suspender un balde con agua y se lo empieza a hacer rotar, al comienzo el agua no acompañará el movimiento rotatorio. Pero una vez que por el roce entre el agua y las paredes internas del balde el agua comience a rotar, la superficie del agua se curvará por efecto de las fuerzas centrífugas. Sin embargo, si el balde se frena de golpe, el agua seguirá rotando y la superficie seguirá mostrando la correspondiente curvatura. Newton de aquí saca la conclusión de que las fuerzas centrífugas son el efecto que se produce cuando un cuerpo está en rotación respecto del espacio absoluto (ya que el balde había sido detenido en el último tramo del experimento). Pues bien, Mach señala que puede pensarse que las fuerzas centrífugas son efecto no de la rotación respecto del espacio absoluto sino respecto de la

distribución total de la materia en el universo. Si el agua rotara con todo el universo no podría apreciarse curvatura alguna en su superficie. Con esto Mach relativiza el fenómeno de la rotación (aceleración angular): la rotación de un cuerpo es tal frente a otros cuerpos.

Si así asumimos el principio de Mach, debemos sacar la conclusión que si el balde tuviera paredes suficientemente gruesas y está en rotación respecto del agua, se produciría en ella el mismo efecto que si el agua misma rotara, es decir, se produciría una curvatura en su superficie. Esta consideración llevó a Einstein a pretender integrar las llamadas fuerzas centrífugas y otras que dependen de sistemas de referencia en rotación como la fuerza “Coriolis” bajo su teoría de la gravitación (Reichenbach 1957, p. 233). Las fuerzas centrífugas y la atracción gravitatoria debían caer bajo un mismo encuadre conceptual dado que las primeras también dependen de un sistema de referencia acelerado, sólo que en sentido angular, no lineal como en el caso del experimento mental del ascensor.

Los anteriores son entonces algunos de los requisitos con los que debía cumplir una teoría de la gravitación relativista. ¿Cómo diseñar la teoría para que satisfaga todas estas demandas? Este es el punto donde más brillantemente sale a relucir el genio de Einstein. Su propuesta es que la métrica del espacio-tiempo está en función de la distribución de la materia. Para ello echa mano de la geometría cuatridimensional de curvatura variable de Riemann, resultando la curvatura en una región dada del espacio-tiempo una función de la distribución de la materia. Las célebres ecuaciones de campo de Einstein precisamente correlacionan una variable geométrica (la curvatura) con una magnitud física (la densidad de la materia). Por medio de este expediente, Einstein lograba una teoría de la gravitación tanto más amplia que la clásica en la medida en que logra una unidad teórica incluso con las fuerzas electromagnéticas por medio del concepto de campo y una relativización completa de los sistemas de referencia dado que ahora pueden ser considerados todos inerciales.

En la relatividad general, el movimiento gravitatorio acelerado ya no es tal: se ha convertido en un movimiento inercial. En términos aristotélicos, se ha “naturalizado”. Las trayectorias de los cuerpos en caída libre ya no son desviaciones del movimiento inercial rectilíneo de la geometría euclidiana adoptada por Newton, sino que son geodésicas de un continuo cuatridimensional riemanniano, para el cual el espacio-

tiempo físico es un modelo. En la teoría de la gravitación relativista, las trayectorias de los cuerpos en caída libre son inerciales, es decir, cumplen la primera ley de Newton pero en el contexto del espacio-tiempo cuatridimensional riemanniano.

En la física relativista, la cuarta dimensión, el tiempo, no es independiente de las tres dimensiones espaciales. Esto ya podía visualizarse en la geometría de Minkowski o en las transformaciones de Lorentz adoptadas por Einstein para su relatividad especial. De esto resulta que una alteración en la métrica del espacio-tiempo en función de la distribución de la materia, como prescribe la relatividad general, también producirá una alteración de la métrica del espacio tridimensional, si la relatividad general quiere ser consistente con la especial y constituir su generalización. De aquí que la relatividad general se corresponde con ciertos fenómenos con los cuales la gravitación clásica no era compatible. Estos fenómenos, que a continuación mencionaremos, sirvieron como piedra de toque para validar la nueva teoría ante la comunidad científica.

El famoso perihelio de la órbita de Mercurio, que no se ajustaba exactamente a la teoría clásica, resultó explicado con toda precisión por la nueva teoría. Además, se observó el corrimiento al rojo de la luz proveniente del sol, lo que significaba que el tiempo en un campo gravitatorio intenso como el del sol sufre una dilación apreciable. Por último, la teoría relativista predice una desviación de la luz al pasar de modo tangencial por la superficie del sol (respecto de una recta euclidiana) diferente a la que hubiera predicho la teoría clásica si se la hubiera corregido para someter a los rayos luminosos a la fuerza gravitatoria. Hecho que se comprobó experimentalmente con ocasión de un eclipse en 1919 y significó el triunfo definitivo de la teoría.

Capítulo 2. Desarrollo inicial de la tesis convencionalista

En este capítulo estudiaremos los argumentos de quienes pueden ser considerados referentes clásicos del convencionalismo: Poincaré y Reichenbach. El trabajo de Poincaré es especialmente importante ya que la tesis convencionalista ve precisamente su origen en la interpretación que el matemático francés hace del estatuto epistemológico de los axiomas de la geometría, ante el surgimiento de pluralidad de sistemas geométricos. A Reichenbach debemos una reconstrucción de la física relativista que reviste gran interés filosófico. Tiene el mérito de haber hecho extensivo el convencionalismo geométrico a la física relativista. Sin embargo, hacia el final de esta tesina argumentaremos que la reconstrucción propuesta por Reichenbach no acierta a dar con la auténtica estructura de la física relativista, perdiendo de vista buena parte de la originalidad propia de la innovación einsteiniana y restando validez a su pretensión de extender el convencionalismo geométrico de Poincaré a la física.

2.1. Convencionalismo geométrico de Poincaré

En el matemático francés Henri Poincaré encontramos al primer representante del convencionalismo. La postura de Poincaré es bien característica y solo comprensible en el contexto de la polémica entre neokantianos y empiristas. La posición de nuestro autor pretende ser consistente con el empirismo al rechazar la idea de intuición pura kantiana. Vamos a ver a Poincaré en toda ocasión señalar que los principios de la geometría no son verdades *a priori* (en sentido kantiano) ni *a posteriori*. Son convenciones moldeadas por su mayor conveniencia para organizar los datos empíricos, análogas a las convenciones métricas.

El hecho que dispara la reflexión de Poincaré es la aparición en escena de geometrías alternativas a la euclidiana. Profundo conocedor de las mismas, este autor llega a la convicción de que los axiomas de la geometría tienen el carácter de estipulaciones arbitrarias. En *Science and Hypothesis* (1905), afirma que si los axiomas geométricos fueran intuiciones sintéticas *a priori* como piensa Kant, no existiría siquiera la posibilidad de concebir geometrías diferentes a la euclidiana (pp. 48-49). Fundamenta su posición diciendo que si negamos un auténtico principio sintético *a priori*, como el principio de la inducción matemática, no podríamos desarrollar aritmética alternativa

alguna. Por otro lado, sostiene que, si bien la geometría se desarrolla guiada por la experiencia, sus principios no son intuiciones empíricas. Si así fuera, la geometría no podría ser una ciencia exacta sino una ciencia natural sujeta a permanente revisión. Concluye diciendo que: “Los axiomas de la geometría no son intuiciones sintéticas *a priori* ni hechos experimentales. Son convenciones” (1905, p. 50 * trad. propia). Si bien la elección entre todas las convenciones posibles está guiada por la experiencia, la elección permanece libre. Solo queda limitada por la necesidad de evitar la contradicción.

Además, Poincaré se ocupa de demostrar que la geometría hiperbólica es tan consistente como la euclidiana, dado que para salvar el estatus privilegiado de la geometría euclidiana se objetaba que eventualmente podrían hallarse contradicciones en ella. Proponiendo un modelo euclidiano de la geometría hiperbólica, logra expresar la totalidad de sus teoremas bajo los postulados euclidianos, con lo que demuestra su igual consistencia (1905, p. 43). Procedimientos análogos son igualmente posibles para los otros tipos de geometría no euclidiana.⁶

Muestra asimismo que la definición de recta es interna a cada una de las geometrías disponibles. No hay una definición externa a la cual las geometrías tengan que acomodarse y que permita juzgar a una como verdadera y a las otras como simples artificios matemáticos (1905, p. 74). En otros términos: no hay experimento posible que nos informe qué línea es recta o qué superficie es un plano. Cada geometría define dentro de ella a qué línea se le llama “recta” y a qué superficie “plano” cuando establece un criterio de congruencia (una métrica) y con esas definiciones juzgamos luego los hechos. Por tanto, cualquiera de las definiciones disponibles es válida dentro de su contexto: así como no hay una recta verdadera tampoco habrá una geometría verdadera.

En *The Value of Science* (1958) profundiza los mismos razonamientos. Muestra que los “movimientos” euclidianos, es decir, aquellos cambios de posición de un segmento de

⁶ Coffa (2005) precisa que debemos en primer lugar a Helmholtz una interpretación de la geometría hiperbólica bajo el modelo euclidiano. El mismo autor señala que el trabajo de Helmholtz fue pionero a la hora de refutar la existencia de una intuición pura del espacio, y en este sentido precedió a Poincaré. Más aún, Coffa señala que las raíces del convencionalismo geométrico están en Helmholtz antes que en Poincaré, sólo que el alemán no las explicitó por no ser compatibles con su empirismo oficial (pp. 87-103). También puede verse al respecto Reichenbach 1957, p. 36. Aunque Coffa también señala que Kant no se hubiera dejando conmovido por la aparición de geometrías no euclidianas lógicamente consistentes ya que según Kant la geometría euclidiana no es lógicamente necesaria sino intuitivamente necesaria (p. 91).

recta bajo los cuales se conserva su distancia no son naturales respecto de los no euclidianos supuestamente artificiales (pp. 38-39). Ya que si bien es cierto que si uno transforma la posición de un segmento de recta euclidiana en un plano de métrica no euclidiana su distancia no ha de conservarse, ocurre lo mismo si tomamos un segmento de recta no euclidiana y lo sometemos a un “movimiento” euclidiano. Las leyes que controlan el cambio de posición de un segmento de recta al interno de cada geometría están precisamente diseñadas para conservar las distancias de los segmentos de recta propios. Por tanto, no hay un sistema de transformación de posiciones (o en otros términos, un criterio de congruencia) que trascienda los sistemas geométricos y desde el cual puedan ser juzgados: este criterio de congruencia no está dado ni por la experiencia ni por una intuición pura, vendrá definido por convención.

Propone también una interpretación física para una de las geometrías concebidas por Riemann, la geometría esférica, pero fácilmente adaptable a cualquiera de ellas. Supóngase un mundo esférico con la particularidad de que en el centro hay una temperatura máxima y en la medida en que uno se aleja del centro y se acerca al borde exterior de la esfera la temperatura disminuye hasta alcanzar el cero absoluto (1905, pp. 66-68). Los cuerpos en la medida en que se enfrían se contraen hasta llegar a una extensión cero en el caso límite. Supóngase también que los cuerpos alcanzan un equilibrio térmico con el medio de modo instantáneo y que todos ellos tienen igual coeficiente de dilatación. Además, supóngase que la luz es afectada por una suerte de refracción que hace que adquiera curvatura cuando se propaga por regiones de diferentes temperaturas.

Para un observador externo euclidiano, dicho mundo será un mundo finito y podrá dar cuenta de las contracciones y/o dilataciones que sufren los cuerpos, al tiempo que reconocerá las trayectorias curvilíneas de la luz respecto de las rectas euclidianas de su geometría. Sin embargo, para un observador interno (un habitante de dicho mundo), éste, lejos de ser finito es infinito: en la medida en que se interna en regiones lejanas al centro todas las distancias (incluso las de su propio cuerpo) se contraen proporcionalmente. Si alcanzara el borde exterior de la esfera las distancias se reducirían a cero. Por tanto, un habitante de este mundo siempre podrá aproximarse un poco más al límite sin llegar nunca a él: tendrá la convicción de que su mundo tiene extensión infinita.

La geometría que estos observadores internos van a desarrollar seguramente habrá de ser la geometría esférica, que es la que de modo más conveniente describe las condiciones en las cuales los cuerpos físicos de dicho mundo mantienen relaciones de congruencia. Si estos habitantes se tomaran el trabajo de medir triángulos lo suficientemente grandes como para ocupar regiones de su mundo donde la diferencia térmica es suficiente, podrían comprobar que la sumatoria de los ángulos internos del mismo se aparta de dos rectos. De acuerdo a la geometría por ellos desarrollada, las trayectorias de los rayos luminosos serían perfectamente rectilíneas.

No obstante, con este símil Poincaré no pretende concluir que la geometría depende de los hechos, de las condiciones del mundo, de la data empírica, ya que nos muestra también que nada impide que los mismos habitantes desarrollen la geometría euclidiana. Pero emplear la geometría euclidiana en dicho mundo les traerá la complicación de tener que postular la existencia de una fuerza universal que distorsiona los cuerpos convenientemente. El criterio de congruencia establecido por la geometría euclidiana no es el más apropiado para dicho mundo, así como (en tiempos de Poincaré) no parecía apropiado utilizar la reciente geometría no euclidiana para describir físicamente nuestro mundo.

A partir de estas reflexiones Poincaré concluye que si bien los axiomas geométricos son convencionales y existen múltiples opciones lógicamente posibles, la experiencia juega un rol en la adopción de una geometría, ya que torna una opción más conveniente respecto de otras. Para Poincaré, el hecho de que los postulados sean convencionales no implica que la elección de un sistema geométrico para hacer una física sea completamente arbitraria: algunas convenciones son más adecuadas que otras para la descripción del mundo físico, aunque todas sean lógicamente posibles. Si se elige la geometría más adecuada, no será necesario complicar las leyes de la física. Sin embargo, tanto en nuestro mundo como en el del símil, o en cualquiera de ellos, no será posible determinar empíricamente cuál es la geometría verdadera. Más aún, caracterizar a una geometría determinada como verdadera o falsa respecto de un mundo no tiene significado alguno y equivale a preguntarse si el sistema métrico decimal es verdadero respecto a nuestro mundo en comparación con otros sistemas de medición (1905, p. 51). Precisamente este punto es el que revela el carácter convencional de la geometría. Los hechos del mundo no controlan su verdad o su falsedad sino simplemente su conveniencia o inconveniencia, y por ello mismo la adopción de una geometría, aunque

convencional, no es arbitraria, ya que comporta importantes consecuencias a la hora de organizar la data empírica por medio de leyes físicas (1905, pp. 70-71).

De aquí que las pruebas empíricas que algunos pretendieron hacer en siglo XIX para determinar si nuestro mundo es o no euclidiano no puedan ser concluyentes. Aunque no se tiene certeza si la prueba fue efectivamente realizada, se sabe que Gauss proyectó medir la sumatoria de los ángulos internos de un triángulo determinado por trayectorias luminosas entre tres picos montañosos. Poincaré hace referencia a una prueba en función de la paralaje estelar de una estrella suficientemente lejana (1905, pp. 72-73). Los resultados que arrojen estas pruebas, si fueran contrarios al quinto postulado euclidiano, podrían ser reinterpretados postulando diferentes leyes para la óptica. Los experimentos sólo pueden mostrarnos relaciones recíprocas entre cuerpos físicos. No pueden mostrarnos las relaciones de los cuerpos con el espacio geométrico ni mucho menos una métrica propia del espacio físico que haga abstracción de los cuerpos físicos mismos (1905, p. 79). Para Poincaré, no hay experimento para Riemann.

Nuestro autor, mostrando una agudeza notable, se pregunta luego si al menos la topología es una forma impuesta a nuestra sensibilidad (según la tesis kantiana), habida cuenta que la métrica no lo es, según dejamos sentado (1958, pp. 40-41). Poincaré repara en que la topología, al menos parte de su estructura, es una base común a las geometrías euclidianas y no euclidianas. Hablamos del tratamiento del espacio como un continuo amorfo, desprovisto de métrica, donde solamente quedan definidas relaciones de vecindad entre puntos y no hay un criterio para distinguir las rectas del resto de las líneas y los planos del resto de las superficies (recuérdese la aproximación al concepto de topología que ofrecimos en la sección 1.1). Poincaré señala que el estudio de este continuo amorfo es realizado por Riemann bajo la denominación “analysis situs”.

Pues bien, si la topología fuera una forma impuesta a nuestra sensibilidad, estaríamos, aunque más amplia, igualmente encerrados en la “cárcel” kantiana. Poincaré no puede aceptar esto y se preocupa por mostrar cómo el espacio simplemente topológico está “construido” por la mente humana con ocasión de las experiencias habituales en nuestro mundo, sin responder a necesidad apriorística alguna. Para esto toma como la característica fundamental del continuo amorfo su tridimensionalidad, ya que el punto es el “corte” de la línea, la línea el “corte” de la superficie y ésta lo es del espacio, quedando así determinada la tridimensionalidad del continuo amorfo en función de sus

estructuras básicas (1958, p. 43). Finalmente, muestra cómo esta tridimensionalidad está adaptada a las experiencias que tenemos del mundo: las dos dimensiones ya están dadas en la retina, la tercera es el resultado de la convergencia de la visión binocular y la sensación de acomodación muscular de los ojos. Pero señala que si la convergencia de la visión binocular y la sensación motora muscular no fueran siempre coincidentes seríamos capaces de “visualizar” una cuarta dimensión y en función de esta experiencia construir una topología cuatridimensional. De la contingencia del hecho de nuestra percepción tridimensional Poincaré deduce su carácter convencional, carácter que traslada a toda la estructura topológica (1958, p. 70).

Poincaré también extiende su tesis convencionalista a la física clásica y encuentra, solo por mencionar dos elementos, que tanto la ley de inercia como la segunda ley de Newton son convencionales. Dado que no es posible hacer una observación empírica de un movimiento estrictamente inercial (completamente libre de fuerzas), aseverar que su movimiento es rectilíneo y uniforme no puede ser otra cosa que una convención conveniente (1905, p. 91). Lo mismo cabe decir respecto de las definiciones de aceleración, masa y fuerza que entran en la segunda ley de la física clásica. Dado que a cada uno de esos conceptos no puede dárseles un significado empírico determinado, lo único que cabe es proceder a definiciones convencionales que correlacionen un concepto con otro (1905, p. 97). No obstante, da cuenta de la racionalidad de estas convenciones ya que muestran ser las más adecuadas para el desarrollo de una física lo más simple posible. Finalmente, Poincaré se hace eco de la crítica a los conceptos de espacio y tiempo absolutos, inaprehensibles de modo empírico (1905, p. 90). En este punto, Poincaré reproduce un clima general de incomodidad con los principios de la física clásica presente en su generación e iniciado por Ernst Mach. La consideración de Poincaré de los principios de la física como convencionales abrió de alguna manera la puerta a las futuras innovaciones relativistas: si los principios de la física son convenciones, pueden ser revisados.

Es interesante señalar de paso que el mismo Poincaré pronosticó que la geometría euclidiana nunca sería abandonada porque estimaba que ella es la que nos permite tener la física más simple. Lejos estaba de ver el alcance que la obra de Einstein tendría algunos años más tarde. Einstein echará mano de las geometrías no euclidianas porque a partir de la reestructuración de ciertos principios de la física que él propone, la geometría que da lugar a una física más simple es precisamente la no euclidiana.

2.2. Convencionalismo epistémico de Reichenbach

Si pudimos ubicar a Poincaré y con mayor justicia a su predecesor Helmholtz en el contexto del neokantismo y su crítica concomitante, Reichenbach está posicionado algunas décadas más adelante en el contexto del positivismo lógico por sus estrechos vínculos con los miembros del Círculo de Viena. Profundamente influenciado por la física relativista (se convirtió en uno de los primeros filósofos en haberla estudiado a fondo) se apropia de la tesis convencionalista de Poincaré, originalmente concebida por el matemático para los axiomas geométricos y procura extender el convencionalismo a los principios de la física relativista. El interlocutor de Reichenbach es Einstein. Nuestro filósofo ve en el físico una ingeniosa labor de redefinición de los principios de la teoría. Su cometido en cuanto filósofo es explicitar estos principios, preocupación no prioritaria en el trabajo de un físico. Algunos de estos principios, como luego veremos, están íntimamente relacionados con la geometría (v. gr. la métrica o la topología del espacio-tiempo), otros dependen de estipulaciones más bien físicas (v. gr. criterio de simultaneidad).

Dado que los principios según la explicitación de Reichenbach suplen un déficit epistémico (no conocemos por medios inmediatamente empíricos la métrica del espacio) esta forma de convencionalismo suele recibir la caracterización de “epistémico” (Angel 1980, p. 236). Para ser más precisos, el convencionalismo de Reichenbach recibe esta denominación porque es una aplicación de la teoría del *a priori* desarrollada por los positivistas lógicos.⁷ Para los positivistas lógicos el convencionalismo desborda el caso de la geometría, es fuente de conocimiento *a priori* en general. En la introducción hemos explicado que los positivistas lógicos proponen un *a priori* analítico basado en la idea de convención. Nos interesará entonces en esta sección hacer mención de algunos de los principios de la física relativista de acuerdo a la reconstrucción de la misma que Reichenbach ofrece en su obra *The Philosophy of Space and Time* (1957) publicada originalmente en 1927. Primeramente describiremos los principios que según Reichenbach sostienen la relatividad especial. Luego presentaremos un esbozo de la reconstrucción de la relatividad general.

⁷ También podría caracterizarse como convencionalismo semántico, ya que en el contexto del positivismo lógico dicha teoría del *a priori* converge con una teoría semántica de la verdad analítica: es tal en virtud del significado. La parte *a priori* de las teorías no hacen otra cosa que fijar un lenguaje para las mismas.

2.2.1. Definición de congruencia espacial

Reichenbach tendrá especial interés en señalar que la cuestión de cuál es la estructura del espacio físico de entre todas las opciones disponibles en la geometría es decidible de modo empírico (1957, p. 10). Procura ser consistente con el empirismo verificacionista propio de la filosofía de la ciencia a la cual adhiere, y desde aquí se permite criticar el convencionalismo de Poincaré para quien la misma cuestión no se podía resolver por vía empírica (Angel 1980, pp. 232-236). Sin embargo, para proceder a dicha determinación será necesario previamente estipular de modo convencional ciertas definiciones que enseguida describiremos.

Nuestro autor retoma un símil análogo al propuesto por Poincaré. Pero en lugar de considerar indeterminada la cuestión de la estructura del espacio a causa de la hipótesis de fuerzas que distorsionen las longitudes de los cuerpos, Reichenbach pretende convertirla en una cuestión empírica al definir la congruencia de longitudes físicas a distancia de la siguiente manera. Primeramente distingue entre fuerzas universales y fuerzas diferenciales. Las primeras son hipotéticas fuerzas que afectan a todos los cuerpos en la misma proporción y respecto de las cuales no es posible construir paredes aislantes (1957, p. 13). Las segundas, en la medida en que no afectan a todos los cuerpos de la misma manera, generan consecuencias observacionales. Piénsese en el funcionamiento de un termómetro como indicador de la fuerza de dilatación térmica: el distinto coeficiente de dilatación del mercurio respecto del coeficiente del tubo que lo contiene hace que las coincidencias relativas no se conserven cuando se produce un cambio de temperatura. Precisamente, el hecho de que la dilatación térmica sea una fuerza diferencial hace viable la construcción de un dispositivo para visibilizar empíricamente su actuación. Por otro lado, las fuerzas universales no pueden alterar las coincidencias relativas ya que afectan a todos los cuerpos por igual y permanecen empíricamente inocuas. Por ello mismo han de conservar siempre un carácter hipotético. Ahora, justamente la introducción de dicha hipótesis física era la que permitía conservar una geometría determinada (v. gr. la euclidiana) en el caso de que sus teoremas no se verifiquen de modo empírico.

Por lo tanto, para evitar que la cuestión de la métrica del espacio físico quede indeterminada, Reichenbach propone igualar las posibles fuerzas universales a cero, en una serie de estipulaciones que él llama “definiciones coordinativas”, porque coordinan

una entidad física con una entidad geométrica. Anteriormente explicamos que en geometría el criterio de congruencia implícito en una métrica determinada permite reconocer como iguales o diferentes dos distancias cualesquiera. Si queremos coordinar una geometría con el mundo físico deberemos del mismo modo definir cuáles habrán de ser las condiciones en las cuales consideraremos iguales dos distancias físicas. Esto es lo mismo que decir cuándo un cuerpo físico conserva su longitud al ser trasladado de un punto al otro del espacio. En términos más simples, proponer una definición coordinativa entre geometría y física es decir en qué condiciones un cuerpo físico será considerado una regla para medir distancias.

A tenor de su empirismo verificacionista, Reichenbach considera que toda hipótesis que no admita control empírico carece por ello mismo de significado y habrá de ser desestimada. Como ya hemos dejado claro, la hipótesis de la existencia de una fuerza universal no puede generar consecuencia observacional alguna. De aquí que el empleo de una geometría diferente y la introducción de la hipótesis de las fuerzas universales sean descripciones alternativas equivalentes. Por tal motivo, Reichenbach decide tomar la primera opción igualando a cero las fuerzas universales. Así, su definición coordinativa de cuerpo rígido, que hará posible realizar mediciones de longitud y determinar de modo empírico la métrica del espacio tendrá este aspecto:

Los cuerpos rígidos son cuerpos sólidos que no son afectados por fuerzas diferenciales, o respecto de los cuales la influencia de fuerzas diferenciales fue eliminada por correcciones; las fuerzas universales son ignoradas (1957, p. 22 * trad. propia).

Como puede verse, la definición coordinativa de cuerpo rígido permite tener un criterio físico de congruencia entre longitudes a distancia. Es el equivalente físico del quinto postulado geométrico. Sin estas estipulaciones respecto de las fuerzas diferenciales y universales no queda definido qué es un cuerpo rígido, es decir, un cuerpo con el cual se puedan realizar mediciones y eventualmente determinar la métrica del espacio. Como consecuencia de esta definición, la noción de fuerza física queda agotada en la de fuerza diferencial. Se dividen por convención las competencias de la física y las de la geometría: cambios locales explicados por fuerzas físicas, cambios universales atribuidos a la métrica del espacio y explicados por la geometría. Si se sobredimensiona la física habilitando la posibilidad de fuerzas universales la cuestión de la métrica del espacio físico queda sometida a la arbitrariedad. Al mismo tiempo, si a la geometría no

se le añade una definición coordinativa, ésta no puede ser verdadera ni falsa. La definición coordinativa hace a la geometría verdadera o falsa, que es lo mismo que decir (en el contexto del verificacionismo) hace de la geometría del espacio una cuestión empíricamente determinable. Lo peculiar de la propuesta de Reichenbach es que pone al empirismo en física en dependencia de una convención. Nuestro autor tiene la convicción que éste fue el procedimiento implícito utilizado por Einstein. De hecho, es cierto que Einstein prefirió “igualar a cero” las fuerzas distorsivas que el éter hipotéticamente ejercía en los cuerpos que lo atravesaban según la interpretación de Lorentz y prefirió adoptar una topología cuatridimensional, aunque de métrica todavía euclidiana, para el espacio-tiempo de su relatividad especial (explicitada luego por Minkowski). Un procedimiento análogo utilizó respecto de la gravitación en su relatividad general.

2.2.2. Definición de congruencia temporal

Dada una definición coordinativa de congruencia espacial la cuestión de la métrica del espacio (tridimensional) se torna empíricamente decidible. Si a ella añadimos una definición coordinativa de congruencia temporal entonces también según Reichenbach la cuestión de la métrica del espacio-tiempo (cuatridimensional) adquirirá la misma característica. Así como no tenemos medios empíricos que garanticen que la longitud de un cuerpo se conserva cuando se desplaza en el espacio (un cuerpo rígido sólo se obtiene por convención) tampoco los tenemos para garantizar que dos intervalos de tiempo sean congruentes. No hay manera de comparar dos intervalos de tiempo temporalmente separados, ya que el tiempo se mide sobre la base de procesos físicos. Podemos elegir procesos periódicos o movimientos inerciales (1957, p. 115). En el primer caso nada nos garantiza que todos los períodos se cumplan en igual tiempo porque precisamente usamos procesos periódicos para medir el tiempo (piénsese por ejemplo en la rotación o traslación de la Tierra como base de nuestro calendario). En el segundo caso medir tiempos iguales implica medir desplazamientos iguales, lo que supone también una convención (la anterior definición de cuerpo rígido).

Requerimos entonces una definición que establezca la uniformidad de dos intervalos de tiempo. La congruencia temporal será entonces establecida por convención. Para construir nuestra definición podemos tomar un sistema físico sometido a revoluciones

periódicas (la rotación terrestre, un péndulo, etc.) y corregir todas las distorsiones provocadas por fuerzas diferenciales conocidas. En la medida en que un sistema quede aislado, resultará menos afectado por influencias externas que alteren los períodos. Estas influencias externas (por ejemplo la atracción gravitatoria de un planeta sobre el sistema cerrado de la tierra en rotación) son análogas a las fuerzas diferenciales que deben ser corregidas para obtener un cuerpo rígido (como la dilatación térmica).

Pero estas correcciones no son suficientes. Así como son pensables (aunque no empíricamente verificables) fuerzas universales que contraigan o dilaten los cuerpos, también son pensables fuerzas universales que alteren proporcionalmente todos los movimientos periódicos de la naturaleza. Por ejemplo, es pensable la existencia de una fuerza que retarde el tiempo a medida que avanzamos a futuro y haga que cada rotación terrestre dure el doble que la anterior. Dado que todos los períodos naturales sufrirían la misma alteración, la acción de esta “fuerza universal” no acarrearía ninguna alteración empírica. Obtenemos entonces nuestra definición coordinativa de congruencia temporal tomando un proceso natural periódico, corrigiendo fuerzas diferenciales e igualando fuerzas universales a cero (1957, p. 119). Cada período de ese proceso será igual al siguiente, por convención. El mismo resultado se obtendría sobre la base de un movimiento inercial cualquiera, incluso el de la luz, teniendo en cuenta previamente la definición de congruencia espacial dada anteriormente, para definir que distancias iguales se cubren en tiempos iguales.

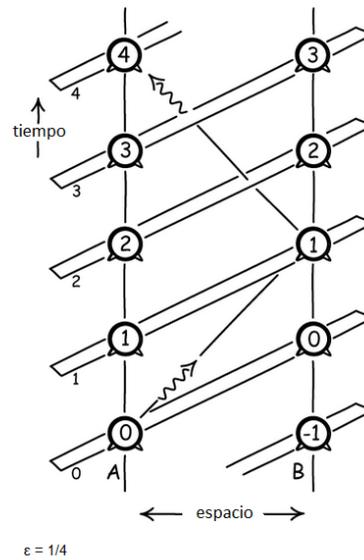
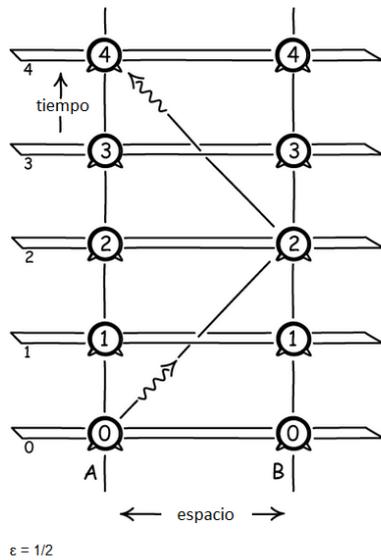
Acabamos de considerar el problema de la congruencia temporal de una serie de eventos en la misma localización espacial. ¿Pero qué ocurre con dos series paralelas de eventos localizadas espacialmente a distancia? ¿Cómo determinar qué evento de la primera serie es simultáneo con uno determinado de la segunda? La definición de congruencia temporal resulta insuficiente, ya que no podemos tener un mismo reloj en dos lugares simultáneamente. Si bien debemos a Mach el primer reconocimiento de que la congruencia temporal sólo puede ser establecida por convención, Einstein tiene el mérito de haber sido el primero en reconocer la necesidad de una convención para la simultaneidad, de acuerdo a Reichenbach (1957, p. 123).

2.2.3. Criterio de simultaneidad estándar

Es necesario precisar aquí que no hablamos de lo mismo cuando nos referimos a la relatividad de la simultaneidad y a una definición coordinativa de simultaneidad. La primera depende sólo de la velocidad del observador, tal como lo establece la relatividad especial (1957, p. 146). Dado que de acuerdo a sus principios, para cualquier sistema inercial la velocidad de la luz habrá de ser la misma, los ajustes impuestos a distancias y tiempos conllevarán que el plano de la simultaneidad (aquel conformado por las líneas “tipo-espacio”) sea diferente para cada observador, tal como pudimos visualizar en el espacio-tiempo de Minkowski. Pero de acuerdo a las definiciones coordinativas del convencionalismo epistémico, el plano de la simultaneidad no queda exhaustivamente determinado por la velocidad relativa del sistema de referencia. Se requiere además una convención suplementaria que la deje completamente definida. Para un observador determinado, se pueden tomar como simultáneos pares de eventos diferentes. Este margen que hace necesaria una convención queda abierto porque las mediciones empíricas de la velocidad de la luz sólo demandan que la velocidad promedio de la luz en cualquier recorrido posible sea la misma. Una determinación de la velocidad de la luz en cada instante de su recorrido es imposible de obtener y debe ser establecida por convención.

Einstein aparentemente no problematiza la cuestión y asume que la velocidad instantánea de la luz es siempre la misma, es decir, que el cociente entre el tiempo que toma a la luz llegar hasta un objeto distante y el tiempo que le toma llegar al mismo objeto y volver al punto de origen es $\frac{1}{2}$. Hacemos referencia a el coeficiente ϵ de Reichenbach que define un criterio de simultaneidad determinado (1957, p. 123). Esto permite obtener una relación de sincronización simétrica y transitiva (1957, p. 168). Pero es lógicamente posible establecer por convención otros coeficientes, por ejemplo $\frac{1}{4}$. Dicha alteración no traería ninguna consecuencia observacional y aunque ciertamente complicaría los cálculos es lógicamente tan viable como el criterio asumido por Einstein. Proponemos una imagen para representarnos mejor el asunto.⁸

⁸ La imagen está tomada de la siguiente página y editada para sustituir términos ingleses por castellanos: http://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/significance_conv_sim/index.html



Como puede visualizarse, si con Einstein asumimos que la velocidad de la luz es constante en cada instante, le tomará el mismo tiempo ir de la serie A de eventos hasta la B y hacer el camino inverso. El coeficiente ϵ en tal caso es igual a $1/2$. El evento 2 de la serie A será simultáneo con el evento 2 de la serie B y así respectivamente. Pero si volteamos a la derecha veremos que al optar por un criterio de simultaneidad no estándar ($\epsilon=1/4$) los planos de simultaneidad resultan alterados. ¿A qué se debe esta alteración? La única manera de conectar dos series de eventos paralelos es mediante un tercer proceso físico que conecte una serie con otra. De este hecho nuestro autor deduce que simultaneidad es lo mismo que exclusión de conexión causal: dos eventos son simultáneos si no pueden ser causalmente conectados (1957, p. 145). Un observador situado en una de las series interactúa con la otra serie por medio de un proceso físico que sirva de “señal”. Dado que no hay proceso físico más veloz que la propagación de la luz, éste resulta el medio más apto para intentar determinar la simultaneidad de dos eventos (es la “primera señal”) ya que reduce al mínimo la cota de eventos simultáneos posibles. De hecho, si la velocidad de la luz fuera infinita, no sería necesaria ninguna convención para determinar la simultaneidad. En tal caso, el tiempo sería una magnitud absoluta.⁹ Un rayo de luz de velocidad infinita parte de la primera serie, conecta con un evento de la segunda serie y en el mismo instante regresa a la primera serie, permitiendo

⁹ Señala Reichenbach que la noción de tiempo absoluto no es lógicamente inviable. Sólo que dependía de una determinación *a posteriori* que la física clásica asumió *a priori*. En eso consistió su error (1957, p. 147).

al observador determinar de modo preciso qué evento de la segunda serie es simultáneo con el de la primera en el instante en que se emitió el rayo luminoso.

Si utilizamos otro medio, como el sonido, durante el transcurso de tiempo en que la señal parte de la primera serie, conecta con la segunda y vuelve a la primera, ocurrieron toda una serie de eventos en la primera y segunda serie y no puede saberse cuál de ellos ocurrió primero. El orden temporal de los eventos en el período de tiempo en el que la señal va y vuelve de una serie a otra queda indeterminado (1957, p. 144). Si utilizamos la señal más rápida posible, dado que el período de tiempo fue menor, obtendremos un margen más estrecho de eventos respecto de los cuales no podemos determinar una precedencia temporal. Ahora, si asumimos por convención un coeficiente ε que prescriba velocidades determinadas a la señal en cada porción de su recorrido, podremos asumir como simultáneos eventos precisos dentro del margen de eventos que nuestra señal ha dejado sin ordenación temporal (1957, p. 145).

Contando ahora con una definición coordinativa de cuerpo rígido y otra de simultaneidad, podemos enfrentar el problema de cómo medir longitudes en movimiento. En la física clásica este problema era invisible porque se asumía tácitamente que la longitud en movimiento era igual que en reposo, bajo el supuesto que la velocidad de la transmisión de las causas era infinita. Extendemos la definición coordinativa de cuerpo rígido de la siguiente manera, para convertirla en operativa en el contexto de la relatividad especial: “la longitud de un segmento en movimiento es igual a la distancia entre las posiciones simultáneas de sus puntos extremos” (1957, p. 155 * trad. propia). Preguntar si la verdadera longitud de un segmento es la de este en reposo o en movimiento no tiene sentido, ya que ambas longitudes dependen igualmente de definiciones coordinativas (1957, p. 157). Así, dicha longitud está en función de la velocidad y de la definición de simultaneidad establecida, que según Reichenbach puede variar de $\varepsilon=1/2$ (1957, p. 158).

La indeterminabilidad empírica de la simultaneidad constituye un núcleo argumental fuerte dentro de la tradición convencionalista y es capitalizada por Adolf Grünbaum (sección 3.2). No obstante, en el capítulo final argumentaremos que este hecho depende de una reconstrucción convencionalista de la física relativista. La relatividad de la simultaneidad tal como fue entendida por Einstein está necesariamente conectada con la

estructura del espacio-tiempo y no puede ser arbitrariamente variada sin alterar sustancialmente la teoría.

2.2.4. Criterio de causalidad estándar

Corresponde ahora hacer mención de una convención adicional relativa no a la métrica del espacio-tiempo sino a su topología. En unas páginas fascinantes, Reichenbach sugiere un experimento mental para ilustrar este punto (1957, pp. 63-65). Supóngase que para un observador determinado, el mundo está compuesto por una serie de esferas que él considera concéntricas. Se desplaza de una esfera a otra, realiza las mediciones correspondientes y al encontrar en la nueva esfera una curvatura más pronunciada supone que se ha desplazado hacia el centro del mundo. Se desplaza nuevamente en la misma dirección y para su sorpresa encuentra que la curvatura de la nueva superficie es la misma que la de aquella de la cual partió originalmente. En ese punto se ve obligado a postular la existencia de fuerzas que distorsionan las longitudes si quiere mantener la métrica que él suponía para su mundo (v. gr. métrica euclidiana). Continúa con sus investigaciones trasladándose de esfera en esfera en la misma dirección hasta que hace un descubrimiento perturbador: se encuentra en una esfera supuestamente distinta de la original y sin embargo todos los eventos son coincidentes con los de aquella. Aquí nuestro observador queda expuesto a esta disyuntiva: o supone que ha llegado a una esfera en la que todos los eventos se repiten en virtud de una armonía preestablecida o queda obligado a suponer que la topología del espacio-tiempo es tal que desplazándose siempre en la misma dirección volvió a la misma esfera en que estaba situado antes. En el ejemplo de Reichenbach, el espacio-tiempo de nuestro observador tiene la topología de un toro geométrico, es decir, una superficie generada por una circunferencia que rota en el espacio en torno a un eje coplanario exterior a la misma.

Nuestro criterio estándar de causalidad establece que unos eventos suceden causalmente a otros de modo lineal e irreversible. No se puede saltar de un evento a otro sin pasar por los intermedios (continuidad) y los eventos son únicos e irrepetibles en el espacio-tiempo (unidireccionalidad). Estas dos características definen nuestro criterio estándar de causalidad. Si nos viéramos en una situación como la de nuestro observador imaginario, una aparente ruptura del criterio estándar de causalidad, él igualmente hubiera podido conservarlo postulando una topología del espacio-tiempo tal que se

acceda a un mismo evento desplazándose siempre a lo largo de una línea (como la topología de un toro geométrico o alguna similar). En el enfoque de Reichenbach, un principio de suyo *a priori*, la métrica del espacio-tiempo, se torna empíricamente decidible cuando convenimos en definiciones coordinativas de congruencia (espacial y temporal) que excluyan la posibilidad de fuerzas universales. De modo análogo, otro principio de suyo *a priori*, la topología del espacio-tiempo, se torna empíricamente determinable cuando convenimos en mantener el criterio de causalidad estándar y excluir la hipótesis metafísica de la existencia de mundo paralelos (1957, p. 80). La estructura causal del universo queda determinada por la topología del espacio-tiempo (1957, p. 268).

2.2.5. Reconstrucción de la relatividad general

El análisis de Reichenbach se extiende a la relatividad general. Así como nos ofreció una reconstrucción de una geometría para la relatividad especial, nos propone también una reconstrucción a partir de sus principios *a priori* de una geometría para la relatividad general. En ella logra, siguiendo los pasos de Einstein, transformar para sistemas de referencia locales las fuerzas gravitatorias en todas sus variantes en la métrica de un continuo cuatridimensional riemanniano de curvatura variable. En otros términos, logra correlacionar el tensor de la métrica de un continuo cuatridimensional con el tensor gravitacional, como consecuencia del principio de equivalencia (1957, p. 253). Este es precisamente el contenido de las ecuaciones de campo de Einstein. En dominios infinitesimales de esta geometría se verifican los teoremas euclidianos, y con ello la geometría reconstruida por nuestro autor para la relatividad especial. Lo que muestra de paso que la relatividad especial queda configurada ulteriormente como un caso límite de la relatividad general (1957, p. 249).

Aquella identificación entre métrica y gravitación conduce a Reichenbach a algunas especulaciones de índole filosófica. Contrariamente a lo que algunos pueden suponer, no se trata de una sustitución de conceptos físicos (la fuerza gravitatoria) por conceptos geométricos (la métrica de un continuo cuatridimensional). La definición coordinativa de cuerpo rígido imponía igualar las fuerzas universales a cero. Y la gravedad es ciertamente una fuerza universal de acuerdo a la definición de Reichenbach: afecta a

todos los cuerpos por igual.¹⁰ De aquí la equivalencia en física clásica entre masa inercial y gravitacional. Si cada especie de material tuviera su propia masa gravitacional, no podríamos considerar las trayectorias de todos los cuerpos en caída libre como geodésicas del espacio-tiempo, ya que cada especie de material tendría su propia geometría (1957, p. 256). Puede verse entonces que la igualación de la fuerza gravitacional a cero lleva a esta aparente “geometrización” de la física. Sin embargo, es posible otra interpretación: la relatividad general propone un vínculo más estrecho entre geometría y física que el supuesto anteriormente. La física clásica (también la relatividad especial) proponía una geometría para el espacio que era tal en la medida en que no se viera afectada por fuerzas físicas: así un cuerpo libre de atracciones gravitatorias tenía una trayectoria rectilínea euclidiana. Sólo en caso de que actúen fuerzas la trayectoria se desviaba de la geodésica de tal geometría. En cierta medida, la geometría en la física clásica es independiente de los contenidos propiamente físicos de la teoría: se distinguen movimientos inerciales (geométricos) de los acelerados (físicos). Esto obligaba además a postular la posibilidad de una “acción a distancia”, ya que no había continuidad física entre un objeto masivo y otro: el medio era puramente geométrico (el espacio). Por otro lado, en la física relativista ya no debemos entender que las fuerzas físicas distorsionan trayectorias impuestas independientemente por la geometría: las fuerzas físicas y la geometría del espacio están por principio unidas de modo que el fenómeno físico queda expresado inmediatamente por una geometría. Ahora todas las trayectorias son inerciales y siguen las geodésicas de una nueva geometría. Así como puede considerarse que la física relativista es una geometrización de la física, es igualmente posible ver en ella una geometría que queda totalmente determinada por la física. Ya no es necesario postular la existencia de acciones a distancia: ahora todas las interacciones físicas son “por contacto” y cumplen las leyes de la transmisión causal. Es decir, las causas se transmiten en un continuo que es físico y geométrico a la vez: el campo (1957, p. 256-257).

2.2.6. La topología del espacio-tiempo

Debemos retomar ahora algunas consideraciones sobre la topología del espacio-tiempo. Dijimos ya que la estructura causal del universo está determinada por ella y que se

¹⁰ Esta afirmación de Reichenbach es discutida por Torretti 1983, p. 237.

convierte en una cuestión empíricamente decidible si convenimos en aceptar un patrón de causalidad estándar: continuo y unidireccional. Pues bien, luego de las consideraciones referidas a la relatividad general, se hace comprensible que la decisión sobre la topología del espacio-tiempo se torna empírica si convenimos en representarnos todas las interacciones físicas como realizadas por contacto (1957, p. 279). Para comprender esto tenemos que considerar que la estructura topológica básica del espacio-tiempo es su cuatridimensionalidad. Una de estas dimensiones determina la dirección de la transmisión de las causas, i. e. las líneas “tipo-tiempo”. Es la dimensión del tiempo la que estructura al todo cuatridimensional de acuerdo al patrón de la causalidad estándar: en la dimensión del tiempo los desplazamientos son unidireccionales y continuos. No ocurre lo mismo en los planos (en realidad continuos tridimensionales) de simultaneidad (piénsese en las líneas “tipo-espacio” del esquema de Minkowski). Allí los desplazamientos pueden darse en cualquiera de las tres dimensiones y son reversibles. Aceptar la acción instantánea a distancia supone romper esta estructura topológica: confundir las líneas “tipo-tiempo” con las “tipo-espacio”, desconocer la peculiar naturaleza del tiempo respecto de las otras tres dimensiones de la realidad física. De aquí que la teoría de la gravitación clásica no hubiera podido ser compatibilizada con la relatividad especial ya que suponía desconfigurar por completo la topología del espacio-tiempo: la estructura causal que supone en el universo no es posible en un continuo cuatridimensional. En cambio, la teoría de la gravitación relativista mantiene inalterada la topología del espacio-tiempo prescrita por la relatividad especial.

Para Reichenbach, la topología es la esencia del espacio-tiempo y permanece como un hecho último de la naturaleza no sujeto a modificaciones (1957, p. 285). Nuestro autor, como Poincaré, se preocupa por descartar teorías que explican la necesidad de cierta estructura topológica en el aparato perceptual humano. La topología en geometría queda definida por relaciones de vecindad y en física por coincidencias empíricas haciendo abstracción de métrica alguna. Para Reichenbach, las coincidencias empíricas son la contracara fenoménica de algo objetivo en la naturaleza y no responden a una necesidad subjetiva de percibir solamente por medio de coincidencias (1957, p. 286). Con esto nuestro autor parece imponer un límite al convencionalismo: si la métrica es objeto de convención, la topología se resiste a serlo (aunque por otro lado nada impide adoptar criterios de causalidad no estándar). El resultado más importante de su estudio, concluye

Reichenbach, es la realidad del espacio-tiempo. Aunque el autor no lo admita por completo, nos parece que de acuerdo a su propuesta la realidad de la topología del espacio-tiempo parece mucho más consistente que la realidad de su métrica, que depende en última instancia de convenciones que hacen posible su descripción (1957, p. 287).

2.2.7. El fundamento filosófico de la física

Reichenbach considera haber obtenido por medio de su reconstrucción de la relatividad especial y general una neta distinción entre los elementos propiamente físicos de la relatividad y su fundación epistemológica, de carácter *a priori* convencional:

El núcleo físico de la teoría, sin embargo, consiste en la hipótesis que los instrumentos de medición naturales siguen definiciones coordinativas diferentes de aquellas asumidas en la teoría clásica. Esta afirmación es, por supuesto, empírica. De su verdad depende solamente la *teoría física de la relatividad*. Sin embargo, la *teoría filosófica de la relatividad*, i. e., el descubrimiento del carácter definicional de la métrica en todos sus detalles, se sostiene independientemente de la experiencia. Aunque fue desarrollada en conexión con experimentos físicos, constituye un resultado filosófico no sujeto a crítica por las ciencias individuales (1957, p. 177 * trad. propia).

La distinción trazada por el autor entre una parte filosófica de la teoría y otra propiamente física es de extraordinaria importancia. Además de pretender asegurar para la filosofía un lugar en un escenario copado por las ciencias particulares, indica en qué medida en el interior mismo de dichas ciencias anidan presupuestos *a priori* que sólo pueden ser filosóficamente analizados, y que lejos de limitarse a delinear quimeras metafísicas hacen precisamente posible que una ciencia particular se confronte con la experiencia. A saber, sólo a partir de ciertos principios coordinativos una teoría puede decir algo del mundo, puede tornarse verdadera o falsa, empíricamente controlable.

En la reconstrucción de Reichenbach, el lenguaje de la física es la geometría con el añadido de una hipótesis física mínima. En realidad, se trata de la exclusión de un conjunto de hipótesis físicas que no pueden tener consecuencia empírica alguna y que no pueden sino funcionar como hipótesis *ad hoc* para salvar una geometría preestablecida (la existencia de fuerzas universales de distinto tipo e intensidad). En ese sentido, las definiciones coordinativas de Reichenbach son las convenciones más

“empiristas” de todas las posibles y están elegidas para dotar del mayor contenido empírico a la teoría física que habrá de desarrollarse a partir de ellas. Con esto supera el criterio propuesto por Poincaré: debe elegirse la geometría en función de la mayor “simplicidad” que tendrá la teoría desarrollada sobre su fundamento. Para Reichenbach no hay criterios empíricos que validen mejor una teoría simple que otra compleja: “la simplicidad no es un criterio que determine lo verdadero” (1957, p. 34).

Cerramos este capítulo dedicado al origen del convencionalismo y su desarrollo en el contexto del positivismo lógico señalando que quizás lo más peculiar del convencionalismo de Reichenbach se aprecia cuando reparamos que en este autor el convencionalismo además de ser la extensión del convencionalismo geométrico de Poincaré es una aplicación de la teoría del *a priori* del Círculo de Viena. La parte *a priori* de la teoría consiste en un lenguaje construido por medio de definiciones. Dicho lenguaje es condición de posibilidad del significado de las proposiciones propiamente físicas, empíricas. En ese lenguaje consiste precisamente el núcleo filosófico de la física.

Capítulo 3. Convencionalismo en el contexto pospositivista

La teoría del *a priori* de los positivistas lógicos estaba inextricablemente conectada con una teoría semántica, en la que la noción de analiticidad era capital. Hacía consistir el significado de cualquier enunciado en su posibilidad de reducción a enunciados básicos observacionales. Permitía a la vez justificar la verdad necesaria de los enunciados *a priori*, analíticos, mientras la verdad de los enunciados *a posteriori* resultaba contingente. Los segundos eran verdaderos a partir de cierta data empírica, los primeros se satisfacían cualesquiera fueran los hechos. Como puede verse, la unidad de significado mínima era el enunciado, fuera analítico o sintético: era una teoría atomista del significado. La tesis convencionalista en la física relativista, tal como fue defendida por Reichenbach, dependía enteramente de una teoría del *a priori* analítico y por ello de una teoría atomista del significado.

A mediados de siglo XX, el empirismo sufrió una evolución que fue determinante para la historia del convencionalismo. W. V. O. Quine ejercería una decisiva crítica sobre las diversas formulaciones de la noción de analiticidad propuestas por los positivistas lógicos.¹¹ Reciclando el holismo epistémico de P. Duhem, formulará una teoría holista del significado que se popularizará como la tesis Duhem-Quine. La principal consecuencia del holismo semántico de Quine será la imposibilidad de una distinción neta entre enunciados analíticos y sintéticos. La teoría semántica del *a priori* quedará fuertemente amenazada. Este hecho forzó finalmente una evolución de la tesis convencionalista en dos líneas divergentes.

La primera sostendrá que los principios de la física son convencionales pero no ya en virtud de motivos epistémicos o semánticos sino en virtud de características fácticas del espacio y tiempo físicos. Se trata del convencionalismo propuesto por Adolf Grünbaum. Este autor continuará defendiendo la posibilidad de distinguir entre enunciados *a priori* y sintéticos y reaccionará críticamente contra la tesis holista de Duhem-Quine. La segunda forma de evolución del convencionalismo está en continuidad con el holismo semántico. Será una forma de convencionalismo semántico trivial en la medida en que no reconoce ningún sentido especial en el que los principios de la física puedan ser convencionales. El todo de la teoría en cuanto construcción lingüística tendrá un

¹¹ Carnap expone diversas formulaciones de la noción de analiticidad en *Logical Syntax of Language* (1935) y en *Meaning and Necessity* (1947).

indiferenciado carácter convencional. Será una forma de convencionalismo defendida por Hilary Putnam, quien entrará en una viva polémica con Grünbaum.

Por estos motivos, en este capítulo exhibiremos en primer lugar la evolución pospositivista del empirismo en la figura de Quine. Luego presentaremos el convencionalismo fáctico de Grünbaum y el convencionalismo trivial de Putnam. Por último, nos interesará presentar en este capítulo el pensamiento de Michael Friedman, quien sostiene una teoría del *a priori* que no depende de una teoría atomista del significado y sin embargo es capaz de sostener que los principios de la física son *a priori* en un sentido especial, que no puede atribuirse al todo de la teoría.

3.1. La tesis Duhem-Quine

En su célebre “Dos dogmas del empirismo” (2005), originalmente publicado en 1950, Quine ataca los dos principios que constituían la médula de la teoría semántica del positivismo lógico. En la primera parte del artículo pasa revista a distintas formulaciones de la noción de analiticidad propuestas por los positivistas lógicos y muestra que todas ellas suponen la misma noción que pretenden explicar. Luego señala las dificultades que los empiristas encuentran para reducir los enunciados sintéticos generales a otros directamente observacionales. Analiticidad y reductivismo son, según Quine, dos dogmas nada empíricos que conserva la tradición empirista del positivismo lógico. Arguye que los dos dogmas están indisolublemente unidos y se sostienen uno a otro pero su conjunto no tiene asidero alguno. La relación entre ambos puede verse en esta cita:

El primer dogma sostiene al segundo del modo siguiente: mientras se considere significativo en general hablar de la confirmación o la invalidación de un enunciado, parece también significativo hablar de un tipo límite de enunciados que resultan confirmados vacuamente, *ipso facto*, ocurra lo que ocurra; esos enunciados son analíticos (2005, p. 263).

Ya en siglo XIX Pierre Duhem había argumentado contra la posibilidad de confirmar empíricamente un enunciado aislado, si bien todavía no había tenido lugar el llamado “giro lingüístico” que desembocaría en un estudio semántico de las teorías científicas.

En “Physical Theory and Experiment”¹² el autor muestra que un experimento en física no puede refutar una hipótesis determinada sino todo un conjunto de hipótesis articuladas en una o incluso varias teorías conectadas. No está atacando un atomismo semántico como más adelante haría Quine. Duhem fundamenta la imposibilidad de confirmar un enunciado aislado en razones solamente epistémicas: la dificultad reside en la estructura lógica misma de la refutación. Una observación que contradice el pronóstico dependiente de la hipótesis en cuestión pondrá en evidencia la falsedad de la conjunción de la hipótesis particular bajo examen y muchos otros supuestos teóricos auxiliares que son necesarios para implicar el enunciado observacional que genera la refutación. Pero no nos señala dónde está el error: “Lo que él [físico] descubre es que al menos una de las hipótesis que constituyen el grupo es inaceptable y debe ser modificada; pero el experimento no señala cuál debería ser cambiada” (Duhem 1976, p. 8 * trad. propia). De esta característica de la prueba científica puede colegirse que es asimismo imposible probar una hipótesis por medio de un experimento crucial.

Duhem ataca aquel principio del empirismo que sostiene que cada término teórico tiene que tener una contraparte empírica operacional o el de aquellos que solo aceptan como principios de la física los resultados de generalizaciones inductivas (1976, p. 28). Nuestro autor nos ofrece una visión de la teoría científica como aquella que en sus principios parte de postulados no constreñidos empíricamente y solo cuando llega a sus conclusiones adquiere el compromiso de ser empíricamente adecuada (1976, p. 27). La teoría como un todo habrá de estar confrontada con el todo de los hechos experimentales (1976, p. 29), dado que no es posible correlacionar cada proposición teórica con un dato experimental concreto. Imponer la restricción de que cada proposición perteneciente a la teoría tiene que tener un significado inmediatamente empírico es entorpecer su desarrollo o incluso hacerlo imposible. Contrariamente, los principios de la teoría tienen el carácter de definiciones (1976, p. 30) y gracias a éstas el resto de las proposiciones adquieren significado.

Como podemos comprobar en la siguiente cita, Quine adhiere al holismo epistémico de Duhem: “el dogma reductivista sobrevive en la suposición de que todo enunciado, aislado de sus compañeros, puede tener confirmación o invalidación. Frente a esta opinión, la mía [...] es que nuestros enunciados acerca del mundo externo se someten

¹² Capítulo XI de su libro *The Aim and Structure of Physical Theory*.

como cuerpo total al tribunal de la experiencia sensible, y no individualmente” (2005, p. 262). Pero va más allá de Duhem al desarrollar una teoría del significado también holista. El significado, si es algo, es una relación entre el todo de una teoría (mejor: el todo de la ciencia como cuerpo coherente de teorías) y el todo de la experiencia sensible. Una teoría científica muestra una doble dependencia, respecto del lenguaje mismo y de los hechos extralingüísticos; no obstante, intentar distinguir el componente lingüístico del factual en las teorías es un cometido que no tiene sentido alguno. No es posible generar una teoría de la confirmación del enunciado aislado, tampoco es viable precisar una noción de analiticidad y mucho menos trazar una distinción contundente entre enunciados *a priori* y sintéticos. Para Quine, la red sigue siendo de “mallas demasiado estrechas”: la unidad de significado no era el término y ni siquiera el enunciado: será la teoría como un todo (2005, p. 263).

Quine nos termina ofreciendo una imagen de la ciencia más difusa que la de Duhem. Hay ciertos enunciados que están en el núcleo de la teoría y están indirectamente conectados con la data empírica, otros en cambio están situados en la periferia de la teoría y están más directamente expuestos al contraste con la experiencia sensible. Sin embargo, en la medida en que no es posible una distinción neta entre contenido *a priori* y sintético, ante una anomalía, se podrán ajustar las relaciones internas de la teoría para salvar tanto un enunciado de la periferia como uno del núcleo. En palabras de Quine, que citamos porque suscitarán la crítica de Grünbaum:

Todo enunciado puede concebirse como valedero en cualquier caso siempre que hagamos reajustes suficientemente drásticos en otras zonas del sistema. Incluso un enunciado situado muy cerca de la periferia puede sostenerse contra una experiencia recalcitrante apelando a la posibilidad de estar sufriendo alucinaciones, o reajustando enunciados de las llamadas leyes lógicas (2005, p. 264).

Estas declaraciones irritarán particularmente a Grünbaum. Y comprendemos el motivo: el holismo en sus dos formas ha dado una enorme cabida al convencionalismo, hasta el punto que cualquier enunciado, incluso los aparentemente sintéticos, pueden sostenerse por convención. Sin embargo, Grünbaum pondrá todos sus medios en defender la posibilidad de que ciertos enunciados particulares, los principios de la teoría de carácter definicional, signifiquen de un modo radicalmente distinto al modo en que significan los enunciados derivados. Los primeros serán convencionales y los segundos empíricos. En las formas holistas del empirismo, el convencionalismo invade todo el campo de la

teoría, cosa que como veremos enseguida Grünbaum buscará evitar. En Quine, la tesis holista se manifestará finalmente como pragmatismo. Dado que la experiencia no es determinante para aceptar o rechazar enunciados, “las consideraciones que le mueven [al hombre] a moldear su herencia científica para que recoja sus continuos estímulos sensoriales son, si racionales, pragmáticas” (2005, p. 267). Quine lleva al empirismo a un límite que no podrá cruzar sin dejar de ser tal.

Es oportuno mencionar aquí que en *Palabra y objeto* (1968), Quine propone de modo consistente con su enfoque una suerte de eliminación de la geometría por medio de una reconstrucción del lenguaje que sustituya expresiones propiamente geométricas por paráfrasis en las que ingresen solamente objetos físicos y expresiones aritméticas. De hecho, ensaya varias propuestas en atención a tal objetivo, aún a conciencia de no resultar por el momento del todo satisfactorias (1968, pp. 264-265). En el holismo semántico, así como no hay neta distinción entre lo *a priori* y lo sintético, tampoco lo habrá entre la geometría y la física: “Está claro que los datos de laboratorio se limitan a influirnos, sin obligarnos, en nuestra actividad de geómetras; pero tampoco constriñen, sino que sólo influyen, en la invención de teoría física. La costumbre y la terminología no deben llevarnos al error de distinguir demasiado entre la geometría y la física” (1968, p. 262). Dado que tanto los enunciados que son en apariencia puramente geométricos como los que son en apariencia puramente físicos están en alguna medida influidos (aunque no determinados) por la data empírica, no hay motivo para una distinción precisa entre unos y otros.

La imagen de una geometría puramente abstracta y *a priori* y una física puramente sintética y determinada por los hechos se desvanece. Recuérdese que, aunque algunos enunciados estén más cerca del núcleo y otros de la periferia en una teoría o conjunto de ellas, todos resultan en alguna manera condicionados por la data empírica y, más perturbadoramente aún, todos resultan convencionalmente salvables. En Quine, la geometría es física y la física es geometría: no hay lugar para tomar aisladamente un elemento (v. gr. la métrica) y considerarlo como principio puramente geométrico y por tanto convencional en un sentido diferente en que puedan serlo cualesquiera elementos considerados físicos o dependientes de la data empírica. Esta imposibilidad de diferenciar entre geometría y física es notable, ya que contrasta con la tendencia del convencionalismo de ver en los principios de la física elementos predominantemente geométricos.

3.2. Convencionalismo fáctico de Grünbaum

Adolf Grünbaum tiene el mérito de intentar dar continuidad a la tesis convencionalista en un contexto postquineano. Esto quiere decir que deberá estar en condiciones de defender la posibilidad de principios convencionales prescindiendo de la noción de analiticidad. Se ve en el aprieto de explicar por qué los principios de la física significan de un modo diferente respecto al resto de los enunciados de la teoría. De acuerdo a lo que nos propone Angel (1980), el llamado “convencionalismo geocronométrico” de Grünbaum depende de la afirmación de que el espacio-tiempo mismo carece de una métrica intrínseca (p. 236). Esta tesis se basa en el hecho de que el espacio, o el espacio-tiempo, es tratado matemáticamente como un continuo amorfo (cualquier continuo n -dimensional en la generalización de Riemann tiene esa característica). Precisamente, la continuidad del espacio-tiempo hace imposible la comparación de dos magnitudes por un proceso de conteo, ya que todos los intervalos de un continuo tal tienen la misma cantidad de elementos (a esa cantidad se le llama técnicamente “cardinalidad”, de acuerdo a la teoría de Cantor). A esto se añade que los puntos de esta clase de continuos son homogéneos, no están por sí mismos ordenados como los elementos del conjunto de los números reales, que también es continuo. Estos “hechos” matemáticos, la continuidad y la homogeneidad del espacio geométrico, inducen a Grünbaum a considerar al espacio físico como carente de una métrica propia. La única manera de hacer mediciones en el espacio será atribuyéndole de modo extrínseco una métrica, por medio de un elemento exterior al espacio, una regla material respecto de la cual, bajo ciertas condiciones, habrá de convenirse en que mantiene su longitud cuando se desplaza en el espacio (Grünbaum 1973, p. 496).

Según Grünbaum, es pensable un mundo en el que el convencionalismo sea falso. Por este motivo preferimos llamar “fáctico” a esta forma de convencionalismo. Si el espacio tuviera una estructura granular o discreta como es el caso en los conjuntos aritméticos, la métrica vendría incorporada en su misma estructura y no sería necesaria ninguna estipulación convencional que, fijando un criterio de congruencia, dote al espacio de modo extrínseco de una métrica determinada (argumento proveniente de Riemann, de acuerdo a la interpretación de Grünbaum 1978, pp. 8-9). En ese hipotético espacio granular, cada objeto físico funcionaría por sí mismo como una regla, podríamos contar en él cuántas unidades de longitud tiene. Dado que esa posibilidad no está dada en el mundo (no por razones epistémicas sino fácticas) las mediciones habrán de ser

necesariamente comparaciones de longitud entre un objeto y otro. Uno será el objeto medido y el otro será la regla. Necesitamos medir, y para medir necesitamos un criterio de congruencia que nos permita comparar una longitud con otra: la regla no puede ser medida por una regla absoluta, por tanto, habrá de fijarse un criterio de congruencia por convención. Entonces, según nuestro autor, es una condición del mundo, y no una condición de nuestra estructura cognoscitiva, la que nos pone en la obligación de hacer convenciones para contar con una métrica y eventualmente desarrollar una física.¹³

3.3. Convencionalismo trivial de Putnam

Hilary Putnam, en cuanto representante del empirismo pragmatista, polemizará con Grünbaum. En 1974 publicó su artículo “The Refutation of Conventionalism” (La refutación del convencionalismo). La primera nota relevante a nuestros fines en dicho artículo es la siguiente. Putnam señala que si bien Grünbaum generalmente hace uso de ejemplos relativos al espacio tridimensional para argumentar a favor de su tesis de la carencia de una métrica intrínseca, su tesis pretende ser aplicada igualmente al espacio-tiempo cuatridimensional relativista. Según Putnam no es tan claro que la adopción de una métrica en dicho campo sea igualmente convencional, aunque Grünbaum ha enfatizado que sí lo es (Putnam 1974, p. 28). En un segundo momento, Putnam pretende desmontar la tesis convencionalista de la siguiente manera. El convencionalismo define primero arbitrariamente una noción por medio de una serie de restricciones que deben ser satisfechas. Así, en el caso de la física, se determinan *a priori* ciertas condiciones que definen una coordinación de congruencia de distancias. Luego se ofrece una prueba de que dicha definición no determina la extensión de la noción en cuestión. Así, varias o infinitas métricas satisfacen la definición coordinativa dada. Por último, se introduce la tesis convencionalista. En palabras de Putnam: “en cualquier caso en que haya objetos incompatibles que satisfagan las restricciones dadas, entonces no hay un hecho que determine cuál de los objetos es el correcto” (1974, p. 31 * trad. propia). Según nuestro autor, la estructura misma del argumento convencionalista muestra en qué está

¹³ Roberto Torretti se muestra crítico de Grünbaum en un doble sentido: 1) cuando Grünbaum afirma que las propiedades intrínsecas del espacio (sean o no topológicas) resultan insuficientes para determinar una métrica propia, está haciendo una mera declaración sin fundamento ya que no lista las propiedades que habría que analizar; 2) el convencionalismo geocronométrico aunque viable para el espacio y el tiempo por separado, no tiene aplicación en la teoría relativista donde se trabaja con un espacio-tiempo cuatridimensional (1983, p. 243).

equivocado: el convencionalismo es una forma de esencialismo, ya que la extensión queda indeterminada en la medida en que la noción en cuestión se declara agotada en su significado por medio de la definición dada. Putnam explica que el convencionalismo no es usualmente reconocido como una forma de esencialismo porque es un esencialismo negativo. Es decir, define convencionalmente parte de la noción (hasta allí no hay compromisos esencialistas), pero luego declara que no es posible intuición ulterior alguna de cualquier propiedad de la noción en cuestión (lo que comporta según el pragmatista Putnam una negación del esencialismo tan esencialista como el mismo esencialismo).

Si algo queda del convencionalismo, según el autor que estamos presentando, es una forma trivial del mismo: la tesis de que el lenguaje en todo su conjunto es convencional. A esta forma de convencionalismo Putnam le llama “convencionalismo semántico trivial” o “TSC” (1974, p. 32)¹⁴. Grünbaum sostenía que incluso dada una serie de definiciones de congruencia no habrá un hecho empírico que nos permita reconocer cuál estructura lingüística es un modelo del mundo físico, no como consecuencia de las condiciones generales en que se da el lenguaje sino como consecuencia de las características específicas del espacio-tiempo físico. Putnam argumenta que el convencionalista no puede sostener su tesis y al mismo tiempo no tenerla por falsa o por una instancia de TSC (1974, p. 33), precisamente porque las convenciones no pueden producir la verdad, de acuerdo a lo establecido por Quine en su artículo “Truth by Convention” de 1935. En la mente de Putnam (y de cualquier pragmatista) es imposible un proyecto fundacionalista del lenguaje. Las referencias siempre han de adaptarse a usos ya previamente dados (esta hipótesis permite, por otro lado, que funcione la argumentación de Quine contra la verdad por convención): “la empresa de intentar determinar algún conjunto finito de proposiciones que contengan un término que es verdadero en virtud de su significado, mucho menos un conjunto de proposiciones que agoten el significado, es vana” (Putnam 1974, p. 33 * trad. propia).

Por ello Putnam prefiere pensar que las referencias quedan determinadas no por convención sino por coherencia: intentamos estructurar el conjunto total de la ciencia de modo de maximizar la coherencia interna y externa: simplicidad lógica y adecuación a la data empírica. Prosigue Putnam: “Grünbaum ciertamente no ha probado que existan

¹⁴ “TSC” por sus siglas en inglés, denominación de la que Grünbaum se hará eco en sus réplicas.

dos formulaciones de la ciencia total tales que comporten dos métricas diferentes para el espacio-tiempo físico” (1974, p. 33 * trad. propia). Exige remitirnos al conjunto total de la ciencia ya que este conjunto constituye la unidad semántica mínima. Según Putnam, si la coherencia es la que determina la referencia, la hipótesis de que es posible un universo lingüístico diverso en el que la física se constituya a partir de una métrica alternativa no es sino una instancia de convencionalismo lingüístico trivial (TSC), tan trivial como decir que es posible un universo lingüístico alternativo en el que el sonido “perro” sea intercambiado en su referencia por el del sonido “gato” (Putnam, 1974, p. 34). No se trata entonces, siguiendo con el razonamiento de nuestro autor, del hecho o de la verdad de que haya o no fuerzas universales respecto de una métrica o de otra. Olvidémonos de las convenciones referidas a “fuerza” y “congruencia” que pretenden fijar su significado –siempre siguiendo la concepción pragmatista– y caigamos en cuenta que dichos significantes son recíprocamente ajustables en términos de coherencia con al menos una porción de la data empírica de la cual quiere dar cuenta la física. “Fuerza” y “congruencia” por sí mismos no significan nada aunque se los pretenda definir, y en la medida en que signifiquen algo lo hacen de modo relativo respecto a sus significados al uso: el convencionalismo geocronométrico es entonces una subtesis del TSC (1974, p. 34).

3.4. Intercambio crítico entre convencionalismo trivial y fáctico

Corresponde ver ahora de qué manera Grünbaum se defiende de la objeción de Putnam. Su estrategia es la siguiente: insiste en que el convencionalismo geocronométrico es consecuencia de las propiedades estructurales del espacio y tiempo físicos, sin negar que existe en otro nivel un convencionalismo semántico trivial. El punto es que incluso una vez que se ha dotado de un contenido semántico al significante “congruencia”, la cuestión de la métrica del espacio-tiempo continúa indeterminada. Y dado que la data empírica en cuanto a la métrica del espacio-tiempo no nos compele de un modo u otro, su determinación en relación a una definición coordinativa de congruencia no puede ser sino convencional, en un sentido esencialmente diferente del anterior. Este sentido específico de convencionalismo no depende en modo alguno de las condiciones del lenguaje sino de una característica precisa del continuo espacio-temporal, a saber: su continuidad y homogeneidad (1973, p. 28). En definitiva, el convencionalismo

geocronométrico es una contribución a la teoría del espacio-tiempo, no a la semántica (1973, p. 30).

El convencionalismo que se impone en la definición coordinativa de congruencia y con ello el de la adscripción de una métrica para el espacio-tiempo está en paralelo –señala Grünbaum– con el convencionalismo que Einstein tuvo el mérito de detectar en la definición de simultaneidad a distancia (1973, p. 28). Precisamente, Einstein advirtió que no había base empírica para determinar un criterio de simultaneidad, como había supuesto la física clásica, y que dicha determinación debía correr por cuenta de una definición. Sería absurdo entender que la convención que Einstein reconoció necesaria en una definición de simultaneidad es meramente semántica, porque de otra manera dicho señalamiento no hubiera comportado innovación alguna en la teoría física: hubiera sido un señalamiento trivial y sabemos que no fue tal (1973, p. 30).

Putnam salva el honor de Einstein evitando reducir su aporte a un caso de TSC arguyendo que mientras nunca generaríamos contradicción adoptando la definición de congruencia estándar (la del cuerpo rígido de Reichenbach), en caso de que hubiéramos continuado usando la definición de simultaneidad absoluta (la de la física clásica y que rechaza Einstein) sí hubiéramos caído en inconsistencias con el material empírico. Grünbaum responde que el argumento de Putnam no se aplica: reconocer la inconsistencia que hubiera acarreado sostener la definición clásica de simultaneidad obligó a Einstein a abandonarla pero no a escoger una definición determinada entre todas las remanentes posibles. Dicha operación solo pudo depender de una convención en el sentido de Grünbaum, no se debió a una convención semántica ni a una constricción empírica (1973, p. 31).¹⁵

Otra manera en la que Putnam intenta defender su posición es construyendo ejemplos de TSC en otras ramas de la ciencia. Grünbaum se ocupa consecuentemente de mostrar cómo tales ejemplos no dependen de la falta de determinación empírica sino que responden meramente a la arbitrariedad en el uso del lenguaje. Es decir, son buenos ejemplos de TSC pero no significan que el convencionalismo geocronométrico caiga bajo la misma categoría (1973, p. 36). Señala Grünbaum que en los ejemplos de Putnam

¹⁵ Friedman criticará aquella homologación de Grünbaum entre congruencia y simultaneidad y mostrará que los casos son esencialmente diferentes. Señala que la métrica de la geometría de Minkowski para la relatividad especial sí distingue el criterio de simultaneidad elegido por Einstein de todos los otros posibles (1983, pp. 309-310).

las convenciones semánticas son “usadas” mientras que en el convencionalismo geocronométrico las mismas son “mencionadas” (1973, p. 37). Apela aquí a una importante distinción entre el uso que se hace de una palabra en el contexto de un lenguaje y su mención en el contexto de un metalenguaje. Lo que permite interpretar que Grünbaum, sin contradecir frontalmente la tesis de Putnam en todos sus aspectos, pone a su versión del convencionalismo en otro nivel, a salvo del TSC, entendiendo a la física (y a cualquier otra ciencia particular) como una suerte de metalenguaje que toma el lenguaje corriente como objeto. Concluye su defensa de este modo: “en breve, hay un importante sentido en el cual la geocronometría física es *menos empírica* que todas o casi todas las porciones no geocronométricas de otras ciencias” (1973, p. 41 * trad. propia * cursivas propias). Precisamente, ese peculiar déficit de determinación empírica de la métrica del espacio-tiempo hace específico al convencionalismo geocronométrico y lo distingue esencialmente del TSC, según la pretensión de Grünbaum.

3.5. Hacia un *a priori* no convencionalista: Friedman

3.5.1. La vía metodológica

Corresponde cerrar este capítulo con el aporte a la cuestión de Michael Friedman, quien tiene la peculiaridad de realizar una crítica del convencionalismo desde un empirismo moderado pretendiendo mantener una forma relativizada de *a priori* para las teorías científicas en general y para la física en particular sin comprometerse con una ontología del espacio y del tiempo como ocurre en el convencionalismo fáctico. Friedman trabaja en el campo semántico, aunque como ya veremos evita tanto el extremo atomista como el holista. Nuestro autor entiende que la evolución de la física clásica a la relativista pone en evidencia el rol que un componente *a priori* tiene en las teorías. Sin embargo, evita la denominación “convencional” para dicho componente *a priori* porque no quiere asumir la mitad escéptica de su carga semántica: Friedman guarda la convicción de que las teorías pueden ser de un modo u otro controladas por procedimientos empíricos para aproximarlas a la verdad.

Comencemos por la crítica de Friedman a Reichenbach. La despliega en su obra consagratoria de 1983, *Foundations of Space-Time Theories*. El autor reconoce que el convencionalismo de Reichenbach, como ya se ha señalado, es epistémico. Depende del

hecho de que no puede ser empíricamente verificado si una regla rígida es o no congruente con sí misma cuando se traslada en el espacio. Este enfoque, señala Friedman, depende también de una teoría empirista de la verificación para la cual si dos teorías son empíricamente equivalentes también son completamente equivalentes, ya que el vocabulario teórico puede ser completamente reducido a uno observacional (1983, p. 297). Dadas dos teorías físicas empíricamente equivalentes que emplean métricas alternativas, no puede decidirse entre ellas sino por vía convencional. Y dado que de acuerdo a la teoría verificacionista dos teorías empíricamente equivalentes son también completamente equivalentes (son descripciones equivalentes, tienen el mismo significado) el valor de verdad de la teoría elegida también será arbitrario: no hay una teoría verdadera contra otra falsa (1983, p. 267).

Como ya hemos explicado, el verificacionismo atomista propio del positivismo lógico no pudo resistir las eventuales críticas y tuvo que ser abandonado. Con esto, la homologación de teorías empíricamente equivalentes a teorías completamente equivalentes pierde razón de ser: se abriría la posibilidad de determinar de modo no arbitrario el valor de verdad de teorías empíricamente equivalentes por medio de otros procedimientos de decisión no reduccionistas. No obstante, existen algunos casos paradigmáticos de determinación *a priori* al interno de la física relativista que no dependen de la mencionada condición epistémica de las teorías científicas en general. Dichos casos son, a saber: la sustitución de la velocidad absoluta¹⁶ por el espacio-tiempo de Minkowski en la relatividad especial (equivalente al principio de constancia de la velocidad de la luz por las razones expuestas 1.2.1 y 1.2.2) y la sustitución de la aceleración gravitacional por el principio de equivalencia entre masa inercial y gravitacional en la relatividad general. Podría salvarse el convencionalismo epistémico de Reichenbach si se lograra inscribirlo como uno de estos peculiares casos de la física relativista, rompiendo su dependencia con la teoría verificacionista. La respuesta de Friedman es que dicha inscripción no es posible (1983, p. 298).

La diferencia entre la adopción arbitraria de una métrica y la eliminación de la velocidad absoluta o la aceleración gravitacional estriba, siempre según Friedman, en que mientras una métrica no puede ser variada arbitrariamente sin desajustar la teoría con la evidencia empírica (variar la métrica comportaría modificar otros componentes

¹⁶ Mantenemos la terminología de Friedman. Se trata de la velocidad no relativa a un sistema inercial sino al espacio y tiempo absolutos, en la física clásica.

de la teoría para mantener su consistencia), la velocidad absoluta en el contexto de la física clásica podía ser arbitrariamente variada sin que esto comportara consecuencia alguna. Mientras la indeterminación empírica de los mencionados casos paradigmáticos es fuerte, la propia de la métrica en una teoría física es sólo débil: no genera consecuencias empíricas de modo aislado, pero sí las genera en conjunción con el resto de la teoría (1983, p. 299).

Por supuesto, Reichenbach no ignora que variar arbitrariamente la métrica supone hacer adaptaciones en otros elementos relevantes de la teoría. Pero pasa por alto el hecho de que las teorías alternativas así generadas, si bien empíricamente equivalentes para un empirismo reduccionista, no son completamente equivalentes ya que puede fundamentarse una elección entre ellas en virtud de principios metodológicos: los tradicionales principios de parsimonia y de identidad de indiscernibles. Repárese en lo siguiente: mientras, por ejemplo, la velocidad absoluta en la física clásica no está estructuralmente conectada con el resto de la teoría, la métrica sí lo está. En el vocabulario de Friedman, el primer elemento teórico no tiene “poder unificador” (y por lo mismo, poder explicativo) mientras que el segundo sí lo tiene. El principio de parsimonia recomienda eliminar elementos teóricos superfluos como la velocidad absoluta, pero no descartaría con la misma facilidad una métrica determinada (1983, p. 300).

El caso de la geometría del espacio físico no puede ser entonces homologado a otros casos paradigmáticos internos de la física relativista y no puede ser considerado convencional en los mismos términos. Ya dejamos claro que tampoco puede obtenerse por consideraciones epistemológicas generales la cualificación de convencional para dicho elemento: si uno adhiere a un verificacionismo atomista no puede sino exigir que un elemento teórico quede empíricamente indeterminado de modo fuerte para poder considerarlo convencional ya que el verificacionismo no admite modos débiles de confirmación. De otro modo, todos los elementos teóricos podrían ser considerados convencionales, con lo que el convencionalismo mismo se vuelve trivial y pierde su especificidad (1983, p. 300). Bajo tal hipótesis, cualquier proposición de la teoría combinada de geometría y leyes físicas se convierte en una definición coordinativa, lo que aterrará a Reichenbach (1983, p. 301).

Pasemos ahora a la crítica de Friedman a Grünbaum. Nuestro autor reconoce que la obra de Grünbaum persigue el objetivo de mantener vigente el convencionalismo geométrico (geocronométrico en este caso) por fuera del paradigma verificacionista. Por ello el convencionalismo de Grünbaum no dependerá de motivos epistemológicos sino que buscará fundamentación fáctica. Como ya sabemos, indagará en las propiedades “intrínsecas” del espacio y tiempo físicos (1983, p. 302). Friedman desmontará el principal argumento de Grünbaum (aquel que apela a la continuidad y homogeneidad del espacio y tiempo físicos en función de lo que ocurre en los continuos n -dimensionales matemáticos) afirmando que del hecho de la no posibilidad de configurar una métrica a partir de las características topológicas y ordinales de un continuo no se sigue la no existencia de una métrica intrínseca del espacio y tiempo a no ser que incluyamos una premisa adicional: que las únicas propiedades espacio-temporales que existen objetivamente son las topológicas y ordinales (1983, p. 304). La ordinalidad (una manera determinada de ordenar sucesivamente los elementos de un conjunto) de un continuo es un elemento que Grünbaum considera intrínseco porque es fundamental para su teoría de la estructura causal del espacio-tiempo, en la que no podremos profundizar aquí.

¿Qué razones tiene Grünbaum para afirmar que las propiedades métricas no son intrínsecas (o “primitivas” en el vocabulario de Friedman)? Vivimos después de Quine, por lo que Grünbaum no puede volver al argumento usado por Reichenbach: la métrica no es una propiedad objetiva del espacio por su carácter definicional. Por el contrario, Grünbaum deberá justificar la convencionalidad de la métrica a partir de una constatación de su no existencia en el mundo físico. Entiende Friedman que para ello tendría que argumentar en términos internos de la física contemporánea: serán considerados elementos intrínsecos aquellos cuya representación teórica tengan máximo “poder unificador” en nuestras mejores teorías físicas. Por el contrario, aquellos elementos sin poder unificador alguno, como la velocidad absoluta de la física clásica, serán considerados elementos puramente subjetivos y extrínsecos (1983, p. 305).

Friedman presenta dos ejemplos de la argumentación de Grünbaum al respecto. El primero es la aparente adopción convencional de una métrica del espacio relativa a una métrica del tiempo y viceversa, en función de la elección arbitraria de un sistema de referencia inercial. Ciertamente, como sabemos, la relatividad especial pone en relación recíproca espacio y tiempo de modo que las velocidades de las partículas sean siempre

relativas a la velocidad de la luz. Señala Friedman que ver convencionalismo aquí es un grave error de interpretación de la física relativista. Grünbaum confunde aquí relatividad con convencionalismo: la única trayectoria real de una partícula es su intervalo en el espacio-tiempo cuatridimensional. Se puede abstraer el espacio tridimensional del espacio-tiempo físico de infinitos modos, pero esa forma de arbitrariedad no integra la estructura de la teoría (1983, p. 307): es una mera especulación convencionalista. El segundo intento de justificación lo toma de la relatividad general. Grünbaum sostiene que la variabilidad de la curvatura del espacio-tiempo de la relatividad general pone en evidencia el carácter extrínseco de su métrica. Friedman opina que esto solo pone en evidencia el carácter dinámico de la métrica del espacio-tiempo de la relatividad general. Y concluye:

Aunque geometrías alternativas y “definiciones de congruencia” son de hecho posibles para cualquier continuo espacial dado, el real depende de la distribución de la materia y de las ecuaciones de campo de la relatividad general; no depende de una elección arbitraria de un estándar métrico (1983, p. 307 * trad. propia).

Friedman incluso prosigue en la crítica del convencionalismo de Reichenbach y Grünbaum fuera de la discusión (a la que hemos prestado mayor atención en esta presentación) relativa a la convencionalidad de la métrica. También atacará el aparentemente bien atrincherado concepto de convencionalidad de la simultaneidad. Recuérdese que Einstein había fijado un determinado valor $\varepsilon=1/2$ para la simultaneidad estándar en la que se asumía que la luz tiene siempre la misma velocidad instantánea. Reichenbach e igualmente Grünbaum muestran que son posibles criterios alternativos donde ε asume otro valor entre 0 y 1 distinto al seleccionado por Einstein. Remitimos al lector al pasaje donde explicamos esto con cierto detalle (sección 2.2.3). Indica Friedman que la simultaneidad estándar está de alguna manera incorporada en la estructura del espacio-tiempo de Minkowski: dada una línea “tipo-tiempo” determinada adoptada como eje de un sistema inercial, el plano de la simultaneidad estándar no será arbitrario sino precisamente aquella hipersuperficie ortogonal respecto de la línea “tipo-tiempo” seleccionada. Dado un valor de ε diferente de $1/2$ la hipersuperficie no estándar de simultaneidad no queda exhaustivamente determinada sin añadir *ad hoc* una estructura suplementaria al espacio-tiempo de Minkowski: elemento que carecerá de poder explicativo alguno y que será rechazado si aplicamos el mencionado principio de parsimonia. Nótese entonces que la simultaneidad estándar no queda parangonada como

pensaran los convencionalistas con los casos paradigmáticos mencionados de la física relativista: v. gr. mientras la eliminación de la velocidad absoluta no acarrea necesariamente ruptura alguna en la posible estructura de una teoría física, el abandono de la simultaneidad estándar obliga a alterar visiblemente la estructura misma del espacio-tiempo adoptado (1983, pp. 309-312).

Grünbaum había argumentado en favor de la convencionalidad de la simultaneidad distinguiendo entre simultaneidad topológica y simultaneidad métrica. La primera queda definida por la siguiente relación: dos eventos son simultáneos si no hay una cadena causal que los conecte. Esto se corresponde en la geometría de Minkowski con el siguiente hecho: dos eventos serán simultáneos si no hay una línea tipo-tiempo que los conecte. Para Grünbaum el tiempo tiene existencia objetiva en la medida en que se identifica con la relación física de causalidad en el sentido en que una señal física conecta un evento con otro (recuérdese que la luz es la primera señal porque representa la transmisión causal misma)¹⁷. Grünbaum sostiene, en perfecto paralelo con su argumentación en torno a la no existencia objetiva de un criterio de congruencia, que la simultaneidad ha de ser convencional porque la simultaneidad métrica no puede deducirse de la topológica. En otros términos: la simultaneidad topológica solamente establece que ϵ ha de ser mayor a 0 y menor a 1. Si bien este punto puede concederse, el argumento no es concluyente porque llegados a la relatividad general, no solo la topología sino también la métrica del espacio-tiempo quedará determinada por la data empírica (1983, pp. 317-320).

Como puede verse, una asunción fundamental en la argumentación anticonvencionalista de Friedman en su texto de 1983 son los llamados principios metodológicos de selección de teorías empíricamente equivalentes. Su principio de parsimonia (que se remonta a la escolástica) funciona según sus propias palabras como una “espada de doble filo”:

Cuando se aplica a ciertos ejemplos especiales de teorías empíricamente equivalentes (las teorías del espacio absoluto y las del potencial gravitacional), provoca las deseadas conclusiones escépticas sobre las entidades controversiales en cuestión, y lleva a nuevas teorías basadas en la estrategia de las descripciones equivalentes. Sin embargo, cuando el mismo principio es aplicado a ejemplos más típicos de teorías empíricamente

¹⁷ También en Reichenbach 1957, aunque Friedman se salta esa observación (p. 136).

equivalentes (que incluyen aquellas involucradas en los casos centrales de la congruencia y simultaneidad), no lleva a tales movimientos metodológicos escépticos; en su lugar, justifica nuestra preferencia por la más “simple” (más parsimoniosa) teoría estándar (1983, pp. 337-338 * trad. propia).

El principio parece estar justamente acuñado en vistas a “cortar” todo resabio convencionalista de una nueva teoría del *a priori*, el *a priori* relativizado, que lleva el sello de Friedman. Sin embargo, cabe todavía preguntarnos cómo puede defenderse que dicho principio metodológico excluya todo elemento de arbitrariedad. Habremos de esperar hasta el desarrollo completo de la teoría del *a priori* relativizado en *Dynamics of Reason* (2001).

3.5.2. La teoría del *a priori* relativizado

Friedman (2001) propone la existencia de un *a priori* relativizado, que aunque por obvias razones ya no se corresponda como el *a priori* kantiano con una intuición pura del sujeto trascendental, sigue siendo constitutivo del objeto de la ciencia. A la vez, el *a priori* relativizado será a la vez históricamente revisable. Friedman tiene la convicción que el desarrollo reciente de la ciencia ha puesto en evidencia la existencia de este componente *a priori* relativizado en la misma, haciendo especialmente foco en el desarrollo de las más avanzadas teorías en la física matemática. En ellas el autor encuentra una parte empírica, consistente en leyes propiamente físicas, como las leyes del electromagnetismo y las ecuaciones de campo de Einstein. Pero también una parte “constitutivamente *a priori*” consistente en las estructuras puramente matemáticas empleadas, como la geometría de Minkowski en la relatividad especial y la teoría de los continuos [*manifolds*] de Riemann en la general y además ciertos principios que cumplen la función de definiciones coordinativas, como las tres leyes de Newton en la física clásica, el principio de la constancia de la velocidad de la luz en la relatividad especial y el principio de equivalencia entre masa inercial y gravitacional en la general¹⁸ (2001, p. 71).

¹⁸ El principio de equivalencia tiene como expresión inmediata una ley *a priori* que debe considerarse una formulación alternativa del mismo principio coordinativo: las trayectorias de las partículas gravitacionalmente aceleradas son geodésicas de la métrica del espacio-tiempo.

La anterior aserción de Friedman le obliga a desafiar el holismo semántico de Quine, en la medida en que este autor consideraba vedada la posibilidad de una distinción neta entre principios *a priori* y proposiciones empíricas al interno de una teoría (2001, p. 74). A Friedman le interesa aislar los principios *a priori*, no se contenta con reconocer este componente como difusamente distribuido en el todo de la teoría. Como veremos, la estrategia de Friedman pasa por definir el *a priori* relativizado evitando tanto recurrir a la problemática noción de analiticidad socavada por Quine como al “dogma” reductivista que pretendía definir en qué condiciones un enunciado era significativo. Lo que Friedman pretende es que los principios *a priori* de las teorías sean “presuposiciones” de las proposiciones empíricas en el sentido en que son condiciones necesarias no sólo de la verdad de las mismas sino de su significado o posesión de un valor de verdad. Sin los principios *a priori*, las aserciones sintéticas no llegarían a ser siquiera verdaderas o falsas (2001, p. 74).

El positivismo lógico había intentado definir las condiciones en que los enunciados son significativos por medio de una teoría que tenía por objeto el enunciado aislado, haciendo abstracción de las relaciones semánticas que pueda haber entre unos enunciados u otros. El único tipo de relación entre enunciados en que habían reparado era la relación lógica. Por otro lado, el holismo, ante la dificultad de llevar adelante tal empresa llevó la semántica al otro extremo: la unidad mínima de significado es la teoría completa. Más aún, dado que ninguna teoría carece de relaciones con otras, seguir el curso de la tesis holista nos lleva a afirmar que en definitiva la unidad semántica es el lenguaje en todo su conjunto. Ante este panorama nótese lo ingenioso de la propuesta de Friedman: ahora el significado (las condiciones de verdad) de los enunciados sintéticos está dado en su dependencia respecto de los *a priori*. Lo que nos permite entender Friedman es que en una teoría física, el vínculo coordinativo produce significado. Por otro lado, Friedman no genera compromiso alguno con la verdad de los principios *a priori* hasta tanto queden coordinados con los sintéticos: permanecen como abstracciones matemáticas sin valor de verdad. No son verdades analíticas. Asimismo, los enunciados propiamente físicos significan a expensas de la coordinación que suponen, de ninguna manera porque puedan ser reducidos de modo aislado a enunciados directamente observacionales. Friedman logra escapar simultáneamente de la doble trampa en que había caído el positivismo lógico: en su teoría del *a priori* relativizado el significado de los enunciados se produce sólo a partir de su coordinación.

Señala Friedman que los argumentos holistas de Duhem-Quine hacen blanco en teorías que tienen una estructura lógica hipotético-deductiva, pero no en una que articula principios matemáticos con proposiciones sintéticas por medio de principios coordinativos (2001, p. 85). Cuando una teoría de este tipo es probada empíricamente, no se somete a control la conjunción de principios matemáticos con sintéticos sino su coordinación. La parte que resulta probada es la propiamente física. La parte *a priori* puede ser eventualmente reemplazada si fuera incapaz de ser coordinada exitosamente con la data empírica en las leyes físicas sometidas a control, pero de ninguna manera esto ha de ser el resultado de una confutación empírica de este componente, sino de un elemento decisional. Nótese que no puede haber control empírico posible hasta que tales principios son presupuestos.

Es sabido que las estructuras matemáticas aisladas no admiten prueba empírica alguna. Tampoco los principios coordinativos, aunque debe reconocerse que contienen referencias empíricas. Algunos pretenden ver en el experimento de Michelson-Morley una confirmación empírica del principio de la constancia de la velocidad de la luz. Pero ha de notarse que el mismo dato empírico arrojado por este experimento dio lugar divergentemente por un lado a la creación de un nuevo principio *a priori*, el que habría de fundar la relatividad especial; y por otro a la modificación de las leyes físicas vigentes para integrar el nuevo dato sin alterar sus presupuestos *a priori*: se trata de la interpretación física de Lorentz relativo al éter mencionada en la sección 1.2.1 (2001, p. 87). Ciertamente, Einstein eleva un dato empírico particular a principio constitutivo, sin embargo dicha “elevación” no está determinada por la data empírica misma sino que “tiene que intervenir un elemento esencialmente no empírico de decisión” (2001, p. 88). Friedman en este pasaje evita cuidadosamente hacer uso de la expresión “convención”, según él mismo lo hace notar, aunque coincida con parte de su contenido, por razones que explicitamos anteriormente.

Sin embargo, esto no quiere decir que no existan decisivas motivaciones empíricas y no solamente metodológicas como entendía Friedman en su texto de 1983 para preferir la coordinación relativista respecto de la clásica (2001, pp. 88-89). De hecho, si dos teorías con principios *a priori* diversos fueran empíricamente equivalentes existen medios metodológicos para proceder a un discernimiento entre ellas, en virtud de la parsimonia u otro principio. Sin embargo, en 2001 Friedman cuenta con una teoría del *a priori* relativizado. Supóngase, propone Friedman, que generamos una teoría clásica

alternativa que incorpore el principio de equivalencia y acepte una métrica riemanniana de curvatura variable donde las geodésicas coincidan con las trayectorias de las partículas en caída libre (o gravitacionalmente aceleradas según el enfoque clásico). Sin embargo, esta teoría clásica alternativa conserva el principio de simultaneidad absoluta contra lo postulado por la relatividad especial. Ahora podemos hacer competir de modo directamente empírico y no meramente metodológico esta alternativa clásica con la relatividad general en virtud de que ambas cuentan con los mismos principios *a priori*. ¿Cuál será el resultado? Las teorías diferirán en sus predicciones empíricas (el avance del perihelio de Mercurio) y la data empírica fallará a favor de la relatividad general precisamente a causa de que la alternativa clásica no cuenta con un espacio-tiempo relativista en la escala infinitesimal: el principio de la constancia de la velocidad de la luz (asumido *a priori* en la relatividad especial) queda ahora probado empíricamente en el contexto de una teoría más amplia.¹⁹ Indica Friedman que esto no ha de sorprendernos: un principio *a priori* resulta sintético en el contexto de una teoría posterior de mayor alcance. Se trata de la dinámica misma de la razón, motivo que inspira el título de la publicación (2001, p. 92).

Cabe preguntarnos qué elementos propios del convencionalismo han sido retenidos y cuáles expulsados de la teoría del *a priori* relativizado de Friedman. En principio podemos afirmar que se ha perdido el elemento de arbitrariedad subyacente en las versiones fuertes del convencionalismo, pero no a causa de razones epistemológicas generales sino por un análisis del desarrollo de la física matemática misma. Sin embargo, se retienen partes significativas de la teoría como convencionales en un sentido nada trivial, superando aparentemente la crítica del holismo semántico. Pero esta reflexión será retomada en el último capítulo de esta presentación.

¹⁹ Nótese que esta suerte de control empírico propuesta por Friedman no cae bajo la crítica duhemiana del experimento crucial mencionada en la sección 3.1. Dado que en la propuesta de Friedman las dos teorías que se confrontan comparten la misma fundamentación *a priori* (las estructuras matemáticas y la coordinación), la experiencia pondrá en evidencia cuál de las dos teorías falla en su parte propiamente física.

Capítulo 4. Hacia un posicionamiento respecto a la tesis convencionalista

Nos proponemos en este último capítulo explicitar algunas relaciones entre las posiciones puestas en juego anteriormente en la discusión sobre convencionalismo en física relativista e intentar posicionarnos en la misma. Pretendemos ofrecer un mapa del tejido argumental de la discusión y mostrar nuestra ubicación en él. Advertimos al lector que el presente capítulo pretende representar nuestro posicionamiento en la discusión solo bajo carácter hipotético, conscientes de la complejidad de un tema cuyo estudio nos encontramos recién en un inicio.

4.1. Convencionalismo y empirismo

Recordemos ahora que, tal como dejamos claro en la introducción de esta presentación, la pugna entre convencionalistas y sus rivales es interna a la tradición del empirismo. Habremos entonces de cruzar a modo de cuadro de doble entrada las distintas variantes del empirismo tratadas con las diferentes posiciones respecto al convencionalismo en física. Como variantes del empirismo mencionamos:

- 1.- Atomismo de los positivistas lógicos;
- 2.- Holismo epistémico de Duhem;
- 3.- Holismo semántico de Quine.

Entre las posiciones respecto al convencionalismo hemos recogido las siguientes:

- 1.- Convencionalismo trivial o TSC (Putnam);
- 2.- Convencionalismo epistémico (Reichenbach);
- 3.- Convencionalismo fáctico (Grünbaum);
- 4.- Teoría del *a priori* relativizado (Friedman, autor que evita llamar convencionalismo a su propia postura).

El convencionalismo, tanto el epistémico como el fáctico, comparte con la teoría del *a priori* relativizado la convicción de que los principios de la física son *a priori* en un sentido especial, que no se corresponde con el carácter *a priori* que en general puedan revestir los principios de otras ciencias, ya que coinciden en considerar que el punto de partida de la física está constituido por principios coordinativos entre entidades matemáticas y data empírica. El TSC no reconoce sentido especial alguno en que los

principios de la física puedan ser *a priori* ya que la única forma de convencionalidad que admite es una trivial en el sentido más débil posible: todas las proposiciones tienen un indiferenciado carácter convencional.

Por otro lado, si asumimos la perspectiva del holismo, encontramos que los principios de la física son *a priori* pero solo en un sentido general compartido con los principios de cualquier otra ciencia: en cuanto hipótesis empíricas generales que se proponen con relativa independencia de la data empírica inmediata disponible y que luego buscan alguna suerte de consistencia con la misma. En cambio en el atomismo las proposiciones generales eran resultado de inferencias inductivas o verdades analíticas inmediatas. El empirismo holista, que abandona el inductivismo, se ve obligado a atribuir el mencionado carácter hipotético a sus proposiciones empíricas generales.

Más específicamente, si asumimos la perspectiva del holismo semántico, obtendremos que todos los componentes de una teoría física, incluso sus principios, tienen algún grado de contenido empírico. Contrariamente, el convencionalismo prefiere pensar que los principios de la física son completamente independientes de la data empírica, hasta el punto que pueden ser sustituidos sin generar consecuencia observacional alguna. De aquí que el convencionalismo, al menos el epistémico de Reichenbach, se desarrolla en el contexto de un empirismo atomista: necesita de una noción de analiticidad lo suficientemente robusta para justificar principios de la física sin contenido empírico alguno. Para el convencionalismo epistémico, los principios coordinativos son más precisamente definiciones coordinativas, por tanto verdades analíticas que se satisfacen vacuamente (por ello la necesidad de añadir una hipótesis física mínima para hacerlas empíricamente controlables, v. gr. la igualación de fuerzas universales a cero). Por otro lado, el convencionalismo fáctico, consciente tras la crítica quineana de que no disponemos de tal noción de analiticidad, pretende fundar en una carencia fáctica las definiciones coordinativas que propone: son verdaderas en virtud de una indeterminación empírica fáctica, no en virtud de razones epistémicas o semánticas.

El TSC es una forma de convencionalismo tan débil que es compatible incluso con la forma más fuerte de empirismo: el holismo semántico. Dijimos ya que el convencionalismo epistémico necesita del empirismo atomista, particularmente de su noción de analiticidad. El convencionalismo fáctico, aunque prescinde de la noción de analiticidad, requiere igualmente de una teoría semántica atomista que permita trazar la

distinción entre *a priori* y *a posteriori*. El holismo admite un componente convencional incluso en las proposiciones empíricas más periféricas, pero esto no lo hace compatible con un convencionalismo fáctico: este necesita salvaguardar un sentido especial para el uso de la palabra convencional cuando se refiere a los principios de la física.

Debe hacerse una importante distinción al interno de las formas holistas de empirismo. Tanto el holismo epistémico como el semántico rechazan la posibilidad de que una constatación empírica particular ponga en jaque a toda una teoría. Ambos conciben una forma holista de interacción entre teoría y data empírica: el todo de la teoría (y sus conexiones con otras teorías) se confronta con el todo de la data empírica. Ante una aparente refutación pueden reajustarse los elementos internos de la teoría hasta lograr una acomodación satisfactoria. En el empirismo holista todas las proposiciones conservan cierto carácter convencional trivial, incluso las más lejanas del núcleo de la teoría, lo que permite sucesivos reajustes y habilita la posibilidad de aplazar indefinidamente una eventual refutación. Sin embargo, holismo epistémico y semántico no coinciden en su rechazo de una teoría del *a priori*. Duhem basa su visión de la ciencia en un análisis de la lógica de la falsación, pero no rechaza por principio la existencia de alguna noción de lo *a priori* que fundamente la posibilidad de principios *a priori* en un sentido especial, aunque por su contexto no tuviera interés en ofrecer una formulación precisa de aquella noción. Quine, por el contrario, se mueve en el contexto posterior al giro lingüístico que procura precisar las condiciones de posibilidad del significado de unos posibles principios *a priori*. Ante los fallidos intentos de los positivistas lógicos por fundamentar una noción de analiticidad que justifique lo *a priori*, Quine no encuentra otra vía que convertir a la teoría completa en la unidad mínima de significado: añade al holismo epistémico de Duhem una teoría holista del significado.

De aquí que ambas formas de empirismo holista difieran en su aceptación o rechazo de una posible teoría del *a priori*. Por esta razón, mientras el holismo semántico rechaza la distinción entre enunciados *a priori* y propiamente empíricos, para el holismo meramente epistémico es todavía viable. Quine entiende que todo enunciado tiene un componente empírico y también uno *a priori* (de aquí que el holismo semántico solo sea compatible con una forma trivial de convencionalismo). Duhem coincidiría con Quine en que todo enunciado tiene un carácter *a priori* general (o “cuasi” *a priori* según la expresión de Grünbaum), y sin embargo acepta también la posibilidad de que algunos

enunciados situados en el núcleo de una teoría sean *a priori* en un sentido especial: v. gr. los principios coordinativos de una teoría física. De aquí que el holismo semántico no será compatible con teorías que admitan la posibilidad de principios *a priori* en un sentido especial, entre ellas los convencionalismos epistémico y fáctico. Por otro lado, el holismo epistémico sí será compatible de suyo con tales teorías, no solo con la forma trivial de convencionalismo. Sin embargo, la amalgama entre convencionalismo epistémico o fáctico y holismo no será posible por requerimientos internos de estas formas fuertes de convencionalismo: como ya se ha dicho, mientras el primero necesita una noción de analiticidad precisa de la que el holismo epistémico no dispone, el segundo requiere igualmente de alguna teoría atomista del significado ya que sus definiciones suponen una verdad fáctica previa.

		<small>Todas las proposiciones del lenguaje son convencionales en un sentido trivial</small>		
		<small>Los principios de la física son <i>a priori</i> en un sentido especial: son principios coordinativos entre entidades matemáticas y data empírica.</small>		
		TSC	A priori relativizado	Convencionalismo
<small>Es posible distinguir entre proposiciones <i>a priori</i> y proposiciones propiamente empíricas</small>	Atomismo [positivistas lógicos]	☺	☺	☺
	Holismo epistémico [Duhem]	☺	☺	X
	Holismo semántico [Quine]	☺	X	X

Las teorías científicas surgen a partir de verdades analíticas e inferencias inductivas

Los principios de la física son *a priori* en un sentido general: son hipótesis empíricas sujetas a corroboración

Holismo: la aceptación de una teoría depende de su consistencia con la totalidad de la data empírica

En la figura anterior podemos representarnos visualmente las relaciones establecidas entre las distintas variantes de empirismo y convencionalismo. Nótese que el TSC es de suyo compatible con las tres formas de empirismo, aunque habitualmente se lo encuentra combinado con el holismo semántico. El convencionalismo será en general solo compatible con formas atomistas de empirismo. Mientras más arriba y más a la derecha nos movemos en el cuadro nos encontramos con combinaciones de variantes más difíciles de sostener porque requieren de dispositivos teóricos de ardua elaboración. Una forma de convencionalismo fuerte exigirá formas atomistas de empirismo; formas triviales de convencionalismo toleran formas holistas. Mientras más abajo y más a la izquierda, nos encontramos con combinaciones más satisfactorias, pero menos

interesantes desde el punto de vista teórico. La “carita feliz” indica las combinaciones lógicamente posibles, el borde grueso señala dentro de aquellas a las que son de hecho identificables en la tradición académica.

La misma figura nos permite también representarnos por qué la teoría del *a priori* relativizado tiene un particular atractivo. Repárese en que aunque sea de suyo compatible con una forma atomista de empirismo, no exige dispositivos teóricos de ardua elaboración como la noción de analiticidad o un verificacionismo atomista, tal y como demandan los convencionalismos epistémico y fáctico respectivamente. Es igualmente compatible con alguna forma holista de empirismo, aunque sí necesita que ella admita la posibilidad de una distinción entre los enunciados *a priori* y los propiamente empíricos. Será el holismo epistémico –en la medida en que esta forma de empirismo permanece abierta a la aparición de alguna teoría satisfactoria del *a priori* que permita trazar dicha distinción– la variante del empirismo holista con la cual la teoría del *a priori* relativizado será compatible y con la cual encontrará su amalgama natural.²⁰

Al mismo tiempo, la teoría del *a priori* relativizado retiene todo lo que de interesante puedan tener las formas fuertes de convencionalismo: la posibilidad de considerar a los principios de la física como *a priori* en un sentido especial, ya que comparte con ellas la opinión de que los principios de la física son principios coordinativos. Sin embargo, la diferencia con el convencionalismo consiste en que para este los principios tienen carácter definicional, mientras que para Friedman son proposiciones originalmente empíricas que luego resultan elevadas a principios coordinativos. Su verdad no es lógica ni convencional sino empírica, aunque no resulten controlados por la data empírica del mismo modo directo en que pueden ser controladas las leyes físicas que se desprenden de ellos. El elemento discrecional que interviene en la elevación de una proposición empírica a principio coordinativo no la convierte en verdadera por convención. Solo la coordinación será “convencional”, pero no la verdad del enunciado mismo aislado. La verdad del enunciado mismo aislado, si es tal, será solamente empírica.

Dado que la teoría del *a priori* relativizado puede inscribirse dentro de una forma holista de empirismo, los principios que la teoría del *a priori* relativizado reconoce en la

²⁰ Nos permitimos señalar esta compatibilidad aunque al mismo autor de la teoría del *a priori* relativizado no le haya interesado reparar en ella.

estructura de la física relativista compartirán con los principios del resto de las teorías científicas el carácter de hipótesis empíricas generales. Esta teoría nos permitirá entonces reconocer la peculiar contribución que la subjetividad realiza al constituir el objeto de la física por medio de sus principios coordinativos sin negarle a los mismos su condición de hipótesis con alcance empírico, evitando la carga escéptica y de arbitrariedad que el mismo Friedman encuentra en el uso del término convencionalismo. Jugando con el título de este trabajo, podemos decir que mientras para las formas fuertes de convencionalismo no hay “experimento para Riemann” posible, para la teoría del *a priori* relativizado, la misma física relativista, o más precisamente Michelson-Morley y las pruebas empíricas de la equivalencia entre masa inercial y gravitacional, constituyen de alguna manera un experimento tal.

Por todo lo anterior nos es permitido entender que la teoría del *a priori* relativizado se encuentra posicionada en el mapa de las posibles combinaciones de variantes del empirismo y del convencionalismo en un sitio estratégico: retiene lo interesante del convencionalismo sin exigir el compromiso con una forma atomista de empirismo que (al menos hasta ahora) no ha superado la crítica que el empirismo ha hecho de sí mismo en la figura de Quine. Ella misma constituye una teoría del significado alternativa a la atomista que hace que el devenir del holismo epistémico al semántico ya no deba ser considerado necesario.

Pero esta razón de conveniencia no puede ser la única que nos lleve a posicionarnos junto a esta teoría como la hipótesis más razonable en la arena de la discusión referida a convencionalismo en física relativista. Estimamos que, mientras las formas fuertes de convencionalismo (las de Reichenbach y Grünbaum) solo funcionan a partir de una toma de distancia de la física relativista en su constitución original y dependen de reconstrucciones de la teoría, la interpretación que Friedman hace de la misma atiende al proceso histórico y lógico mediante los cuales la teoría fue de hecho construida. Los convencionalistas proponen, en su reconstrucción de la física relativista, ciertas definiciones coordinativas que no se corresponden con los principios que realmente cumplen la función coordinativa en la estructura de la teoría. En breve lo estudiaremos.

Recordemos ahora qué condiciones de la teoría del *a priori* relativizado le permiten posicionarse justamente en ese lugar estratégico en que se dan simultáneamente la posibilidad de mantener el carácter *a priori* de los principios de la física en un sentido

especial y el carácter de hipótesis generales con alcance empírico. Por un lado, a diferencia de lo que ocurría con la teoría del *a priori* del positivismo lógico, esta teoría propone que un principio coordinativo es *a priori* no porque pueda ser inmediatamente reducido a verdad analítica sino porque establece *a priori* la posibilidad de significado de los enunciados que dependen de él. Es decir, sin principios *a priori*, los enunciados propiamente físicos no pueden ser controlados empíricamente, es decir, quedarían desprovistos de condiciones de verdad.

Al mismo tiempo, los principios coordinativos se distinguen de los enunciados propiamente físicos en cuanto que los primeros no resultan controlados por la data empírica del mismo modo que los últimos. Aunque eventualmente un principio coordinativo puede ser sustituido por otro que dé lugar a coordinaciones más fecundas, la parte que resulta sometida a control de modo empírico directo es la propiamente física. La lógica de la falsación, cuya conciencia llevó a desechar la teoría atomista de la verificación y eventualmente a declarar no diferenciables los contenidos *a priori* de los sintéticos, se aplica sólo a la parte propiamente física de la teoría, ya que la coordinación se distingue de la conjunción: no es una relación lógica.

De aquí que el control empírico no puede forzar el abandono de un principio coordinativo, su eventual sustitución depende solamente de una decisión pragmática del científico. Sin embargo, de modo indirecto los principios coordinativos sí tienen alcance empírico, ya que su desarrollo en una teoría física completa puede dar mejor cuenta de ciertos fenómenos en comparación con una teoría rival constituida por otra coordinación. Incluso es posible un control empírico directo de un principio coordinativo, ya que una proposición que en una teoría determinada ocupa el lugar de principio puede ocupar el lugar de una ley física en el contexto de una teoría de mayor generalidad. Mostramos en el capítulo anterior siguiendo a Friedman cómo el principio de constancia de la velocidad de la luz que cumple la función de principio coordinativo en la relatividad especial termina siendo controlado empíricamente de modo directo en el contexto de la relatividad general. La teoría del *a priori* relativizado es tal que hace posible una “dinámica de la razón” donde los principios *a priori* son a la vez constitutivos del objeto de la ciencia en un sentido especial (situados más allá del control empírico) y eventualmente sujetos a control empírico directo cuando quedan expuestos como hipótesis empíricas en el contexto de una teoría de mayor alcance. Por último, la teoría del *a priori* relativizado ofrece al empirismo holista en su versión

duhemiana una teoría del *a priori* de la cual carecía, permitiéndole estabilizarse y evitar un fatal devenir hacia una racionalidad meramente pragmática.

Podemos decir que con la teoría del *a priori* relativizado se cumple el sueño de Kant en un contexto empirista-semántico. Los principios de la física relativista según la interpretación de Friedman son *a priori* y sintéticos a la vez. Son sintéticos en cuanto eran originalmente meras proposiciones empíricas: la velocidad constante de luz era un mero dato empírico en el contexto de la física clásica, resultado de experimentación directa. Sin embargo, este *a priori* sintético es perfectamente compatible con el empirismo ya que no son proposiciones de suyo necesarias, sino investidas de necesidad por una decisión pragmática del científico quien decide construir el resto de la teoría de modo tal que dicho enunciado se verifique en cualquier caso. Al mismo tiempo esta teoría del *a priori* constituye una teoría semántica no atomista ya que el componente *a priori*, al funcionar como principio coordinativo entre estructura matemática y data empírica, consigue dotar de significación (empírica) a los enunciados que se desprenden de él. En el contexto del positivismo lógico el significado era una propiedad de cada enunciado aislado. En cambio, el significado es aquí el resultado de una peculiar interrelación entre dos tipos de enunciados, los *a priori* y los *a posteriori*, de suyo todos sintéticos.

4.2. Los principios *a priori* de la física relativista

Finalmente debemos pronunciarnos –siempre según un carácter hipotético– sobre cuáles son los principios *a priori* de la física relativista. Encontramos ya que la respuesta convencionalista a esta pregunta es que dichos contenidos *a priori* son fundamentalmente las estructuras topológica y métrica, aportadas por la geometría. Para dar nuestra respuesta a aquella cuestión confrontaremos los principios que estructuran la teoría con los principios de la física clásica y con los principios de su reconstrucción convencionalista. Nos apoyamos en la interpretación de Friedman, explicitada en el final del capítulo anterior. Esto nos permitirá dar razón de nuestra preferencia por la hipótesis del carácter *a priori* relativizado de los principios de la física relativista. Como ya hemos indicado, las dos formas fuertes de convencionalismo que hemos estudiado (nos permitimos tomar a la teoría del *a priori* relativizado, a despecho de su autor, como una forma moderada de convencionalismo) dependen de una reconstrucción de la física

relativista que no hace justicia a la misma. Mientras Einstein en la relatividad especial erige como principio estructurante de la teoría la constancia de la velocidad de la luz para todo sistema de referencia inercial, Reichenbach y Grünbaum eligen como punto de partida un par de definiciones coordinativas independientes: una definición de congruencia espacial y otra de congruencia temporal. Reichenbach añade a las mismas una hipótesis física para hacerlas empíricamente controlables mientras que Grünbaum no tiene reparo en afirmar que cualquier tipo de coordinación geocronométrica es igualmente viable: escapa a todo control empírico dado que no hay métrica en el mundo físico. Para ser más precisos, hemos visto que Reichenbach en su reconstrucción se ve obligado a añadir múltiples definiciones o criterios *a priori*, v. gr.: una definición de “estar entre”; un criterio de causalidad estándar; un criterio de simultaneidad $\varepsilon=1/2$.

Einstein toma simplemente una proposición empírica puesta a disposición por el experimento Michelson-Morley y en lugar de considerarla una contingencia empírica la convierte en un principio absoluto ordenando todo el resto de la teoría para que dicha proposición se cumpla bajo toda circunstancia. Por supuesto que esta decisión no está forzada por la data empírica: ya dijimos que Lorentz ante la misma data elaboró una hipótesis para salvar la física clásica. Se trata por tanto de la elevación a principio *a priori* de un enunciado originalmente empírico. Esta decisión lleva consecuentemente a Einstein a prescindir del espacio y tiempo independientes newtonianos y a hacer un tratamiento de los mismos como un solo continuo cuatridimensional: solo así pueden relativizarse recíprocamente duraciones y distancias frente a una velocidad de la luz constante para cualquier sistema inercial. La relatividad especial define de modo indirectamente empírico la topología del espacio-tiempo (su cuatridimensionalidad), pero dejará todavía abierta a estipulaciones arbitrarias la determinación de la métrica del mismo, en el sentido del convencionalismo geométrico de Poincaré: en la relatividad especial espacio y tiempo ya no son independientes entre sí pero continúan siendo independientes de las realidades físicas.

Repárese que mientras el principio *a priori* elegido por Einstein guarda un correlato empírico, aunque dicho correlato no fuerce su elevación a principio estructurante de la teoría, la física clásica depende de dos principios *a priori*, el espacio y el tiempo absolutos, que no pueden tener correlato empírico alguno: cuál sea la velocidad de un móvil respecto del espacio y tiempo absolutos es una cuestión que no puede tener contenido empírico. El principio *a priori* relativista está expuesto a contraejemplos

empíricos; los principios *a priori* de la física clásica no. Esta misma consideración llevó a los físicos del siglo XIX a sentirse incómodos con los principios de la física clásica y a percibir en ellos resabios metafísicos. Pero amén de este prurito positivista, la dificultad estriba en que la física clásica parte de un principio (el de la posibilidad al menos teórica de determinar la velocidad absoluta de todo móvil) que admitiría infinitas contrapartes empíricas. Contrariamente, el principio de la relatividad especial está mucho más íntimamente conectado con el resto de la teoría y cumple mejor una función estructurante en la misma, ya que en la misma medida en que se expone a contraejemplos empíricos extiende su poder explicativo. El principio de la posibilidad de determinación teórica de la velocidad absoluta de cualquier móvil respecto a tiempo y espacio no está tan íntimamente conectado con el resto de la física clásica en la medida en que sus correlatos empíricos posibles pueden variar *ad infinitum* y aun así no afectar el resto de la teoría de ningún modo. Lo mismo ocurre con los principios de la reconstrucción convencionalista de la física relativista: son definiciones que pueden variar arbitrariamente haciendo convenientes reajustes en otras partes de la teoría, no tienen conexión con un dato empírico originario, ni determinan en un solo sentido la estructura del resto de la teoría.

Esta consideración es del todo consistente con la teoría del *a priori* relativizado. El principio elegido por Einstein es uno originalmente empírico que se erige en principio estructurante de la teoría precisamente por su capacidad para ampliar el poder explicativo de la física respecto a su precedente newtoniano. Si la nueva teoría es capaz de explicar fenómenos que desde la anterior no encontraban explicación, el principio que estructura la nueva teoría se revela como adecuado, aunque su necesidad no pueda ser probada empíricamente. Mantiene su status *a priori* pero al mismo tiempo se juzga su conveniencia no por motivaciones meramente metodológicas sino por el impacto que tendrá en el poder explicativo de la teoría. Los principios de la física clásica no se muestran tan eficaces en el cumplimiento de esta doble función: determinar la estructura de la teoría en sentido unívoco (poder unificador) y ampliar el rango de fenómenos explicados (poder explicativo).

Asimismo, los principios que los convencionalistas en su reconstrucción de la física relativista asumen como puntos de partida de la misma adolecen de las mismas limitaciones que los principios de la física clásica: son coordinaciones independientes del espacio y del tiempo que deberán ajustarse a un hecho asumido en su mera

contingencia empírica: la constancia de la velocidad de la luz. El camino recorrido por Einstein es precisamente el inverso. La constancia de la velocidad de la luz asumida *a priori* como principio coordinativo nos pone inmediatamente en un espacio-tiempo cuatridimensional. Luego, en la relatividad general, la métrica de este espacio-tiempo para una región dada quedará empíricamente determinada en función de la distribución de la materia. Pero los convencionalistas pretenden en su reconstrucción que la métrica del espacio y del tiempo queda *a priori* determinada en sus definiciones coordinativas. No hay tal cosa en la física relativista. Si en algún sentido la tesis convencionalista era sostenible entre la aparición de la relatividad especial y la general, una vez llegados al completo desarrollo de la teoría relativista ya no queda lugar para el convencionalismo. No sólo una topología cuatridimensional en función de la velocidad de la luz constante queda empíricamente determinada, sino que incluso la métrica del espacio-tiempo queda del mismo modo determinada en función de la equivalencia empírica entre masa inercial y gravitacional. En la relatividad general, el espacio y el tiempo ya no serán independientes de las realidades físicas. Ya no queda lugar para el convencionalismo geométrico de Poincaré ni para el geocronométrico de Grünbaum.

Mientras que tiempo y espacio ya están estructuralmente conectados en el mismo principio coordinativo de la relatividad especial, tiempo y espacio nunca llegan a estar estructuralmente conectados a partir de las definiciones coordinativas de las reconstrucciones convencionalistas.²¹ De aquí que los convencionalistas insistan no sólo en la relatividad de la simultaneidad sino también en su arbitrariedad. La posibilidad de jugar con valores de ϵ distintos a $\frac{1}{2}$ depende de esta falta de conexión estructural. Desde la coordinación relativista, dado un estado de movimiento del sistema de referencia, la hipersuperficie de simultaneidad queda unívocamente determinada. Desde la coordinación convencionalista la hipersuperficie de simultaneidad permanece indeterminada: las tres dimensiones espaciales no están estructuralmente vinculadas a la temporal.

Mientras que los convencionalistas especulan con la posibilidad de que la velocidad instantánea de la luz difiera de c , en la relatividad especial esa posibilidad ni siquiera se contempla. He aquí la razón: para los convencionalistas, la velocidad constante de la luz es una mera proposición empírica. Los principios coordinativos son otros. En la

²¹ Recuérdense las ya citadas críticas de Torretti (1983) al convencionalismo geocronométrico (p. 243) y Putnam 1974 (p. 28).

relatividad especial, en cambio, la velocidad constante de la luz en cada instante funciona como principio coordinativo. Desde el punto de vista de la construcción de una teoría no tendría sentido postular un principio absoluto que admita variaciones: ya que las variaciones posibles se trasladan a los momentos relativos de la teoría: distancias y duraciones. Además, la velocidad determinada c en cada instante es un hecho no sólo empírico sino necesario porque se corresponde con una configuración muy determinada de las relaciones recíprocas entre las cuatro dimensiones espacio-temporales: aquella en que todos los eventos del espacio-tiempo forman un continuo. Esto quiere decir que no hay saltos temporales ni espaciales; en otros términos: los eventos físicos se “comunican” unos con otros “por contacto”, no hay acción a distancia. Por ello eventualmente la relatividad general terminará siendo una brillante corroboración de la relatividad especial, ya que en ella el fenómeno gravitatorio es entendido exclusivamente a partir de una métrica dinámica sobre un mismo continuo cuatridimensional, sin acción a distancia alguna. La métrica del espacio-tiempo de la relatividad general supone la topología del espacio-tiempo de la especial. La gravitación clásica rompía la continuidad cuatridimensional del espacio-tiempo ya que solo un tiempo independiente del espacio hace concebible la posibilidad de una acción a distancia (ver sección 2.2.6). Las reconstrucciones convencionalistas de la física relativista terminan teniendo las mismas dificultades que la física clásica para entender la necesaria conexión que hay entre espacio y tiempo. Y por la misma razón el convencionalismo necesita añadir *a priori* un criterio de causalidad adicional que garantice la continuidad y unidireccionalidad en la estructura de los eventos en el espacio-tiempo. Todo eso ya está contenido en el principio *a priori* elegido por Einstein en la relatividad especial y por ello no necesita añadirlo de modo explícito.

En la relatividad general, Einstein hace de la coincidencia empírica entre masa inercial y masa gravitatoria una ley necesaria que estructura la teoría. Se trata del ya estudiado principio de equivalencia. Este principio hace posible la reducción del fenómeno de la aceleración gravitacional a movimiento inercial mediante un ingenioso expediente: hacer coincidir las trayectorias de los cuerpos en caída libre con las geodésicas del continuo cuatridimensional que representa al espacio-tiempo mediante una métrica variable. Ya sabemos que las ecuaciones de campo de Einstein correlacionan la métrica del espacio-tiempo con una variable empírica conocida técnicamente como “densidad de materia”. Por tanto, muy lejos de los supuestos convencionalistas según los cuales la

métrica (y con ella una estructura topológica) del espacio-tiempo, o –más ingenuamente aún– la métrica del espacio tridimensional, son asignadas *a priori* en la física relativista, resulta que la métrica está en entera dependencia de la data empírica. Más bien hay que decir que la física clásica asignaba *a priori* una métrica para el espacio tridimensional (la euclidiana) y que las reconstrucciones convencionalistas de la relativista pretenden lo mismo. Ciertamente, si se asigna *a priori* la métrica se la puede hacer variar arbitrariamente y reajustar el resto de la teoría para convenir con la misma data empírica. Sin embargo esto no ocurre de ninguna manera en la física relativista, donde la determinación de la métrica en una región dada del espacio-tiempo es enteramente *a posteriori* (en la relatividad general). La tesis convencionalista es una más apta para dar cuenta del diseño de la física clásica que de la relativista. Cabe decir que allí donde hay mayor concesión al convencionalismo (en el sentido de determinación *a priori* arbitraria) se da lugar a una teoría débil en cuanto a unidad interna y poder explicativo respecto de una sucedánea que expurgue de sus principios elementos de convencionalismo en tal sentido.

Posiblemente el hecho que induce a error a los convencionalistas es haber abordado la cuestión del convencionalismo en física a partir de las consideraciones sobre convencionalismo en geometría. Todas las consideraciones de Poincaré sobre el carácter arbitrario de la adopción de una geometría para el espacio tridimensional son razonables. Pero pretender trasladarlas sin más al tratamiento del espacio-tiempo cuatridimensional en física es desconocer lo radical de la innovación einsteiniana. El empleo en física relativista de geometrías no euclidianas de métrica variable indujo en los convencionalistas la confusión de pensar que precisamente los principios convencionales de la física relativista son los aportados por la geometría (o por la geocronometría en términos de Grünbaum): una topología, una estructura afín, una métrica y que podía hacerse un tratamiento epistemológico de los mismos en las mismas condiciones en que Poincaré estudió la posibilidad de sustituir una geometría por otra para interpretar el mundo físico. Sin embargo, por todo el recorrido realizado, la hipótesis que se nos aparece más robusta en el debate sobre el carácter *a priori* de los principios de la física relativista excluye el abordaje convencionalista. Los principios de la física no son solamente elementos de la geometría ni determinados de modo arbitrario. Son proposiciones originalmente empíricas que, conservando la forma de una ley física, al ser erigidas en principios estructurantes de la teoría dotan de significado

empírico al resto de las proposiciones físicas en virtud de efectuar una coordinación entre estructuras matemáticas y data empírica, a tenor de lo propuesto en la teoría del *a priori* relativizado. Friedman nos ha ofrecido una nueva interpretación de la conexión existente entre experiencia y geometría al interior de la física relativista: están estructuralmente conectadas en sus mismos principios. Como concesión a un empirismo moderado y contra los convencionalistas, existen elementos geométricos y empíricos en todas las proposiciones de la física, incluso en sus principios. Como concesión al convencionalismo y contra el holismo semántico, los principios de la física son *a priori* respecto de las leyes derivadas en la medida en que los primeros son condición de posibilidad del significado de las segundas.

Conclusión

A fin de ofrecer mayor claridad al lector, pretendemos en este párrafo dar una respuesta breve y directa a los interrogantes planteados en la introducción y mostrar de modo sintético los resultados de esta investigación. Los principios de la física relativista son el principio de constancia de la velocidad de la luz en la relatividad especial y el principio de equivalencia entre masa inercial y gravitacional en la relatividad general. Los principios de la física relativista tienen carácter *a priori* pero no convencional en el sentido de *a priori* definicionales analíticos como pretendiera Reichenbach o estipulaciones arbitrarias puramente geocronométricas como pretendiera Grünbaum. Hemos adherido al pensamiento de Michael Friedman quien sostiene que los principios de la física relativista son *a priori* de carácter relativizado (para distinguirlo del *a priori* kantiano). No son proposiciones analíticas ni consisten exclusivamente en estipulaciones geométricas sino que son enunciados que combinan elementos geométricos y empíricos y que por un factor discrecional son erigidos en principios coordinativos de la teoría. La coordinación se cumple de tal modo que las leyes físicas erigidas en principios coordinativos son condición de posibilidad del significado (empírico) de las leyes y demás proposiciones derivadas. Por último, hemos sugerido también que la teoría del *a priori* relativizado de Friedman constituye una teoría del significado que mantiene la distinción entre enunciados *a priori* y *a posteriori* y que puede articularse satisfactoriamente con un holismo meramente epistémico.

Bibliografía

- Angel, R. B. (1980). *Relativity: The Theory and its Philosophy*. Londres, UK: Pergamon Press
- Bonola, R. (1912). *Non-Euclidean Geometry. A critical and historical study of its development*. Chicago, USA: The Open Court Publishing Company
- Callahan, J. J. (2000). *The Geometry of Spacetime. An Introduction to Special and General Relativity*. Nueva York, USA: Springer Science+Business Media
- Carnap, R. (1985). *Fundamentación lógica de la física*. Madrid, España: Ediciones Orbis
- Coffa, A. (2005). *La tradición semántica. De Kant a Carnap*. México, México: Universidad Autónoma Metropolitana
- Duhem, P. (1976). Physical Theory and Experiment. En Harding, S. (ed.). *Can Theories be refuted? Essays on the Duhem-Quine Thesis*. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Company, 1-40
- Einstein, A. (1920), *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*. Braunschweig, Alemania: F. Vieweg
- Euclides (1991). *Elementos*. Tomo I. Madrid, España: Gredos
- Feyerabend (1984). *Contra el Método*. Buenos Aires, Argentina: Orbis
- Friedman, M. (1983). *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton, USA: Princeton University Press
- Friedman, M. (1999). *Reconsidering Logical Positivism*. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Friedman, M. (2001). *Dynamics of Reason*. Stanford, USA: CSLI Publications
- Grünbaum, A. (1968). *Geometry and Chronometry in Philosophical Perspective*. Minneapolis, USA: University of Minnesota Press
- Grünbaum, A. (1973). *Philosophical problems of space and time*. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Company
- Grünbaum, A. (1976). The Duhemian Argument. En Harding, S. (ed.). *Can Theories be refuted? Essays on the Duhem-Quine Thesis*. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Company, 116-131
- Jammer, M. (1994). *Concepts of space. The history of theories of space in physics*. Nueva York, USA: Dover Publications

- Kant, Immanuel (2009), *Crítica de la razón pura*, ed. bilingüe, traducción de Mario Caimi, México: Fondo de Cultura Económica.
- Mach, E. (1943). *Space And Geometry In The Light Of Physiological, Psychological And Physical Inquiry*. Chicago, USA: Paquín Printers
- Moulines, C. U. (1979). “La génesis del positivismo en su contexto científico”. En *Cuadernos Críticos de Geografía Humana*. Año IV. Número 19. Enero 1979
- Poincaré, H. (1905). *Science and hypothesis*. Nueva York, USA: The Walter Scott Publishing Co.
- Poincaré, H. (1958). *The Value of Science*. Nueva York, USA: Dover Publications
- Putnam, H. (1974). The Refutation of Conventionalism. En *Noûs*, Vol. 8, No. 1, Symposia Papers to be Read at the Meeting of the Western Division of the American Philosophical Association in St. Louis, Missouri (Mar., 1974), 25-40
- Quine, W. V. (1935/1976), Truth by convention. En *The Ways of Paradox and Other Essays*. Harvard University Press
- Quine, W. V. (1968). *Palabra y Objeto*. Barcelona, España: Editorial Labor
- Quine, W. V. (2005). Dos dogmas del empirismo. En Valdés Villanueva, L. M. (ed.). *La búsqueda del significado*. Madrid, España: Tecnos, 245-267
- Reichenbach, H. (1920/1965), *Relativitätstheorie und Erkenntnis apriori*. Berlin: Springer. Traducido como *The Theory of Relativity and A Priori Knowledge*. M. Reichenbach (ed.), Berkeley–Los Angeles: University of California Press
- Reichenbach, H. (1957). *The Philosophy of Space and Time*. Nueva York, USA: Dover Publications
- Torretti, R. (1983). *Relativity and Geometry*. Londres, UK: Pergamon Press
- Torretti, R. (1984). *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Company