



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

**EL PAPEL DE LAS PRÁCTICAS CIENTÍFICAS DE MEDICIÓN EN EL
SURGIMIENTO DEL CONCEPTO DE ESPACIO-TIEMPO EN LA RELATIVIDAD
ESPECIAL Y GENERAL**

ICR que para obtener el grado de:

Maestría en Humanidades

Con especialidad en:

Filosofía de las ciencias y del lenguaje

Presenta:

Miguel Agustín Aguilar Sandoval

Asesor:

Dr. Godfrey Guillaumin J.

Iztapalapa, Ciudad de México, enero de 2017



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA


ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00336
Matrícula: 2143801345

EL PAPEL DE LAS PRÁCTICAS CIENTÍFICAS DE MEDICIÓN EN EL SURGIMIENTO DEL CONCEPTO DE ESPACIO-TIEMPO EN LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y GENERAL.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:00 horas del día 27 del mes de enero del año 2017 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

- DR. GODFREY ERNESTO GUILLAUMIN JUAREZ
- DRA. FERNANDA SAMANIEGO BAÑUELOS
- DR. ARMANDO CINTORA GOMEZ



MIGUEL AGUSTIN AGUILAR SANDOVAL
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN HUMANIDADES (FILOSOFIA)
DE: MIGUEL AGUSTIN AGUILAR SANDOVAL

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

REVISÓ
LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTORA DE LA DIVISIÓN DE CSH
DRA. JUANA JUAREZ ROMERO

PRESIDENTE
DR. GODFREY ERNESTO GUILLAUMIN JUAREZ

VOCAL
DRA. FERNANDA SAMANIEGO BAÑUELOS

SECRETARIO
DR. ARMANDO CINTORA GOMEZ

Índice

Agradecimientos	5
Cronología	6
Introducción general	12
1.- El estudio de la relatividad.....	12
2.- Objetivo.....	16
3.- Estructura.....	18
Capítulo 1.- Midiendo la velocidad de la luz. La aberración estelar, la luz como onda, el éter y los experimentos de Fizeau	21
1.-Introducción.....	21
2.- La propagación finita de la luz.....	22
2.1- Previo al descubrimiento de la aberración estelar. El problema de la longitud terrestre.....	23
2.2.- Aberración estelar.....	25
3.- Debates respecto de la aceptación del éter durante el siglo XVIII e inicios del XIX.....	27
4.- El principio físico del éter en sus dos versiones más relevantes, la de Fresnel y la de Stokes.	29
5.- Los experimentos de Fizeau.....	31
5.1.- La investigación de Arago sobre el fenómeno de interferencia en la luz.....	32
5.2- Arago y Fizeau sobre el movimiento de la luz a través del agua.....	33
5.3- Midiendo la velocidad de la luz.....	34
5.4- El experimento sobre la velocidad de la luz a través de agua en movimiento y la confirmación del coeficiente de Fresnel.....	36
Capítulo 2.- La luz como onda electromagnética, la contradicción en los datos sobre el éter y los nuevos sistemas de geometría	39
1.- Introducción.....	39
2.1- Primeras mediciones sobre los fenómenos electromagnéticos.....	40
2.2.- Maxwell y la luz como onda electromagnética.....	42

2.3.- La confirmación de la existencia de ondas electromagnéticas de H. Hertz.....	43
3.- Los experimentos de Michelson.....	46
4.- Los nuevos sistemas de geometría en el siglo XIX.....	51
Capítulo 3 La solución de Lorentz y Poincaré. Rescatando al éter.....	57
1.- Introducción.....	57
2.- Primeras investigaciones de Lorentz sobre el éter y la corrección al experimento de Michelson.....	58
3.- El teorema de estados correspondientes, la hipótesis de contracción y el electrón.....	60
4.- Experimentos de algunos científicos para someter a prueba la concepción de éter de Lorentz.....	64
5.- La aportación de Henri Poincaré y la física de principios.....	66
6.- Transformaciones exactas. El artículo de Lorentz de 1904.....	68
7.- La formulación de Poincaré en 1906.....	69
Capítulo 4. Einstein y la relatividad especial. Crisis epistémica.....	72
1.- Introducción.....	72
2.- Los estándares para la medición de distancias y tiempos a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX.....	73
3.- Las primeras dudas de Einstein respecto del éter.....	74
4.- El camino hacia la relatividad.....	75
4.1.- La asimetría en la electrodinámica.....	75
4.2.- La constancia de la velocidad de la luz.....	78
4.3.- La aberración estelar y el experimento de Fizeau.....	81
4.4.- Influencia de Mach y Hume.....	83
4.5.- Coordinación de relojes distantes y solución.....	84
5.- Crisis epistémica.....	87
Capítulo 5 Relatividad general, crisis cognitiva e integración.....	94

1.- Introducción.....	94
2.- El artículo de 1907 y las primeras consideraciones de Einstein sobre sistemas de referencia acelerados.....	95
3.- Límites de la relatividad especial.....	99
3.1 Los obstáculos.....	99
3.2 Primer intento de algunos físicos de capturar la nueva noción de espacio-tiempo en geometría.....	102
4.- Einstein y la geometría no euclidiana. Crisis cognitiva.....	104
5.- La búsqueda de Einstein por las ecuaciones de campo.....	106
5.1- El espacio “le dice” a la materia cómo moverse y la materia “le dice” al espacio cómo curvarse.....	107
5.2- Los principios físicos que guiaron a Einstein y las estrategias en la búsqueda de las ecuaciones de campo.....	110
5.3- El artículo <i>Entwurf</i> y el primer resultado inadecuado en la búsqueda de las ecuaciones de campo.....	112
5.4- Profundizando en el error. El argumento del agujero como defensa de las ecuaciones de campo no covariantes de <i>Entwurf</i>	114
5.5- Regreso a las ecuaciones de campo covariantes. Solución.....	115
6.- Corroboración observacional con el eclipse de 1919.....	117
Conclusiones generales.....	120
Bibliografía.....	123

Agradecimientos

Al terminar este trabajo quiero expresar mi sincero agradecimiento a las personas e instituciones que contribuyeron, de una manera u otra, a su realización.

En primer lugar, a mi asesor el Dr. Godfrey Guillaumin J. por su atención, su paciencia, su tiempo, sus correcciones y su guía durante el desarrollo de este trabajo. Ha sido un privilegio para mí contar con el apoyo de una persona de tantos conocimientos y, además, tan comprometida con la enseñanza.

A los lectores la Dra. Fernanda Samaniego y el Dr. Armando Cíntora por su tiempo y disposición, así como sus valiosos comentarios y observaciones.

En cuanto a las instituciones agradezco a la Universidad Autónoma Metropolitana por todo el apoyo y la formación recibida, así como al CONACYT por su compromiso con la formación de estudiantes de posgrado. Habría sido muy difícil llevar a cabo la investigación necesaria para escribir esta tesis sin el apoyo del programa de becas que otorga esta última institución.

También quisiera mencionar al Dr. José Ernesto Marquina Fábrega cuyas fascinantes clases de licenciatura me motivaron a escoger un posgrado en filosofía de la ciencia. Decisión que nunca he lamentado.

Agradezco a todos aquellos que, formando parte de mi vida personal, contribuyeron a que terminara esta etapa formativa, principalmente a Dios, a mis padres; Luis Enrique Aguilar y María Teresa Sandoval, a mis hermanos; Teresa y Luis, así como a toda mi familia, especialmente a mis abuelos, tíos y primos por su cariño y paciente apoyo a lo largo de mi vida. A mis amigos que son también hermanos; Edith, Luis Ángel, Emanuel, Bernardo, Juan Luis, Oliver, Gabriela, Ilse, Carlos, Arturo y Paulina.

Finalmente, quisiera agradecer también a los amigos y compañeros, así como a los profesores que me acompañaron en la UAM -Iztapalapa durante los años de estudio y realización de este trabajo.

Cronología

~300 a. C. Aparece el libro de *Los Elementos* de Euclides

1609-1610 Galileo Galilei observa las lunas de Júpiter por primera vez y reporta sus observaciones en el *Siderius Nuncius*.

1671-1672 Jean-Dominique Cassini (1625-1712) y Jean Richer (1630-1696) realizan una estimación del tamaño de la órbita de la Tierra.

1676 Jean-Dominique Cassini señaló una correlación entre las irregularidades de los periodos de las lunas de Júpiter y el movimiento de la Tierra alrededor del Sol y propuso que las irregularidades del periodo de *Io* podrían explicarse si suponemos que a la luz le toa tiempo llegar desde Júpiter a la Tierra.

1676 Ole Römer (1644-1710) retoma la explicación de Cassini y estima que a la luz le toma 22 minutos atravesar el diametro de la orvita de la Tierra.

1690 Christian Huygens (1629–1695) publica su *Treatise on Light*.

1693 Nace James Bradley en Inglaterra.

1728 James Bradley reporta sus obaservaciones del fenómeno de aberración estelar y da una explicación de la que concluye que a la luz le toma 8 minutos y 13 segundos la distancia entre el Sol y la Tierra.

1749 David Hartley publica *Observations on Man*.

1762 Muere James Bradley.

1773 Nace Thomas Young .

1777 Nace Carl Friedrich Gauss.

1781 Nace Siméon Denis Poisson.

1786 Nace Dominique François Jean Arago.

1788 Nace Augustin-Jean Fresnel.

1791 Nace Micheal Faraday.

1793 Nace Nikolai I. Lobachevsky.

1795 Se define el metro patrón como una diez millonésima parte de la línea que separa al polo del ecuador.

1800 Primeras baterías de Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta.

- 1803 Thomas Young da una conferencia acerca de sus experimentos sobre la interferencia en la luz.
- 1801 Nace Wilhelm Weber.
- 1816 Fresnel publica *Mémoire sur la diffraction de la lumière*.
- 1816, François Arago publica un trabajo titulado *Note: Sur un Phénomène remarquable qui s'observe dans la diffraction de la lumière* en el que relaciona la interferencia con la velocidad de la luz.
- 1818 En marzo la *Academia Francesa de Ciencias* ofrece un premio para quien presentara un estudio satisfactorio de la difracción. El mes siguiente Fresnel envía su artículo. En este mismo año, Fresnel explica, en una carta a Arago, su hipótesis acerca de la influencia del movimiento de la materia en el éter lumínico.
- 1819 Nace Armand Hippolyte-Louis Fizeau y, el mismo año, nacen Jean Bernard Léon Foucault y George Gabriel Stokes.
- 1820 Descubrimiento del electromagnetismo por el físico danés Hans Christian Oersted. Por la misma época Nikolai I. Lobachevsky y Janos Bolyai, independientemente uno del otro, descubren la posibilidad de crear nuevos sistemas de geometrías sin el quinto postulado de Euclides.
- 1824 Nace William Thomson.
- 1826 Nace G. F. B. Riemann.
- 1827 Muere Augustin-Jean Fresnel.
- 1829 Muere Thomas Young.
- 1831 Nace James Clerk Maxwell.
- 1840 Muere Siméon Denis Poisson.
- 1846 Stokes publica sus ideas sobre el éter en un artículo titulado *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light*.
- 1849 Primer medición terrestre de la velocidad de la luz por Fizeau.
- 1850 Fizeau y Foucault, cada uno de manera independiente, obtienen resultados experimentales acerca de los cambios en la velocidad de la luz cuando ésta pasa por medios densos (como el agua) respecto de su velocidad en medios menos densos (como el aire).
- 1851 Fizeau pone a prueba las hipótesis sobre el éter mediante su experimento sobre la velocidad de la luz en agua en movimiento. Corroboró el coeficiente de arrastre de Fresnel.

1852 Nace Albert A. Michelson.

1853 Muere Dominique François Jean Arago y nace Hendrik Antoon Lorentz.

1854 Nace Jules Henri Poincaré.

1855 Muere Carl Friedrich Gauss.

1856 Weber y Kohlraush investigan la relación entre mediciones electrostáticas y mediciones electromagnéticas. Presentan la constante de Weber. Muere Nikolai I. Lobachevsky.

1857 Nace Heinrich Rudolf Hert.

1862 Medición de la velocidad de la luz realizada por Foucault.

1864 Nace Hermann Minkowski.

1866 Muere G. F. B. Riemann.

1867 Muere Micheal Faraday.

1868 Muere Jean Bernard Léon Foucault.

1872-1874 Alfred Cornu repite la medición de la velocidad de la luz de Fizeau mejorando la precisión de los resultados.

1873 Maxwell publica : *A Treatise on Electricity and Magnetism*.

1878 A. Michelson realiza una medición terrestre de la velocidad de la luz mejorando el método de Foucault.

1879 Nace Albert Einstein en Ulm, Alemania y muere J. C. Maxwell.

1880 La familia de Einstein se trasladadas, con él, a Múnich.

1881 Primeros experimentos de Michelson con su interferómetro para detectar el viento del éter.

1882 Nace Arthur Stanley Eddington.

1886 Michelson y Moreley usan el interferómetro para repetir el experimento de Fizeua sobre la velocidad de la luz en agua en movimiento, confirman los resultados de éste. El mismo año, Lorentz publica *De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux* en donde señala errores en los cálculos de Michelson de 1881 y, junto con otros físicos, pide una repetición del experimento.

1886-1889 H. Hertz publica una serie de artículos en los que reporta sus experimentos con los que muestra la existencia de ondas electromagnéticas.

- 1887 Michelson y Morley repiten el experimento de Michelson de 1881 con un interferómetro mejorado confirmando los resultados.
- 1889 Hertz señala, en una conferencia, la importancia del estudio del éter.
- 1891 Muere Wilhelm Weber.
- 1892 Lorentz publica *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants* donde propone considerar que el éter es completamente transparente a la materia y ésta sólo interactúa con él a través de partículas cargadas presentes en todas las moléculas de la materia (posteriormente llamadas electrones).
- 1893 Oliver J. Lodge diseña un experimento con una “maquina de giros” y un interferómetro como el de Michelson cuyos resultados parecían estar en conflicto con el éter de Stokes.
- 1894 Muere Heinrich Rudolf Hert.
- 1895 Lorentz publica *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* [Intento de una teoría de los fenómenos ópticos y eléctricos de los cuerpos en movimiento]. Einstein de 16 años escribe un ensayo proponiendo una investigación experimental acerca de usar el magnetismo para estudiar al éter (de esta época, supuestamente, es también su experimento pensado de viajar a la velocidad de un rayo de luz).
- 1896 Muere Armand Hippolyte-Louis Fizeau. Einstein ingresa al instituto tecnológico ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) en Zúrich.
- 1898 H. Poincaré publica *La Mesure du Temps*.
- 1899 Lorentz publica *Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems*.
- 1900 Einstein se gradúa del ETH de Zúrich y completa su primer artículo científico (una investigación sobre fuerzas intermoleculares).
- 1902 Experimento de Lord Rayleigh sobre doble refracción para determinar el movimiento de la Tierra a través del éter tomando en cuenta las hipótesis de Lorentz. Primera publicación de *La Science et l'hypothèse* de H. Poincaré. Lorentz recibe el premio Nobel. Einstein se traslada a Berna Suiza.
- 1903 F. T. Trouton y H. R. Noble publican los resultados nulos de su experimento para detectar el movimiento de la Tierra a través del éter. Einstein trabaja en la oficina de patentes en Berna Suiza. Muere G. Stokes.
- 1904 D. B. Brace repite el experimento de Rayleigh con resultados similares. Lorentz publica su artículo *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less Than That*

of Light [Fenómenos electromagnéticos en un sistema en movimiento con cualquier velocidad menor que la de la luz].

- 1905 “*Annus Mirabilis*” de Albert Einstein. Se publican; *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* [Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz], *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* [Una nueva determinación de las dimensiones moleculares], *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* [Sobre el movimiento requerido por la teoría cinética molecular del calor de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario], *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* [Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento] y *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* [¿La inercia de un cuerpo depende de su contenido de energía?].
- 1906 H. Poincaré publica “*Sur la dynamique de l'électron*” [Sobre la dinámica del electrón]. Con las transformaciones de Lorentz en su forma moderna.
- 1907 Einstein publica *Relativitätsprinzip u. die aus demselben gezogen* [Sobre el principio de relatividad y las conclusiones que se deducen de él]. A. Michelson recibe el premio Nobel. Muere William Thomson.
- 1908 Hermann Minkowski construye y publica un formalismo matemático que capturara la nueva noción de espacio-tiempo de la relatividad especial.
- 1909 Einstein se convierte en profesor en Zúrich. Paul Ehrenfest publica sobre el caso del disco rígido rotante en relatividad (paradoja de Ehrenfest). Muere Hermann Minkowski.
- 1911 En marzo, Einstein se muda a Praga y publica el artículo *On the Influence of Gravitation on the Propagation of Light*. Inicia la correspondencia entre Einstein y el astrónomo Erwin Freundlich.
- 1912 Einstein publica dos artículos sobre la velocidad de la luz y los campos gravitacionales. En agosto regresa a Zúrich e inicia su colaboración con Marcel Grossmann. Einstein escribe el *Zürich notebook*. Muere Henri Poincaré
- 1913 Einstein y Grossmann publican el artículo titulado *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation* [Outline of a Generalized Theory of Relativity and of a Theory of Gravitation]. A finales de este año Einstein acepta un puesto en la Universidad de Berlín.
- 1914 Einstein se muda a Berlín, y junto con A. D. Fokker publica el artículo titulado *Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differentialkalküls* [La teoría de la gravitación de Nordström desde el punto de vista del cálculo diferencial absoluto]. Inicia la primera guerra mundial. Freundlich intenta, infructuosamente, hacer

una expedición a Crimea para tomar fotografías de un eclipse solar que corroborara la desviación de la luz en campos gravitacionales.

1915 Einstein publica por primera vez las ecuaciones de campo gravitacional en *Zur allgemeinen Relativitätstheorie* [Sobre la teoría general de la relatividad]. Reporta el primer cálculo correcto del corrimiento del perihelio de mercurio en *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie* [Explicación del movimiento del perihelio de mercurio a partir de la teoría general de la relatividad]. Finalmente, las ecuaciones, en su forma moderna, son publicadas en *Die Feldgleichungen der Gravitation* [Las ecuaciones de campo de la gravitación].

1918 Fin de la primera guerra mundial.

1919 Arthur Stanley Eddington realizó una expedición para tomar fotografías del eclipse de Sol del 29 de mayo. Los resultados son anunciados en noviembre.

1922 La academia de Suecia decide dar a Einstein el premio Nobel de física correspondiente al año 1921 (el motivo es la explicación del efecto fotoeléctrico).

1928 Muere Hendrik Antoon Lorentz.

1931 Muere Albert A. Michelson.

1932 Einstein deja Berlín de manera definitiva.

1933 Einstein toma un puesto en el instituto de estudios avanzados en Princeton, New Jersey.

1944 Muere Arthur Stanley Eddington.

1949 Se publican por primera vez las *Notas Autobiográficas* de Albert Einstein.

1955 Muere Albert Einstein.

2016 Se anuncia la detección de las ondas gravitacionales gracias a un par de detectores interferómetros conocidos como LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) ambos localizados en Estados Unidos y operados por el Caltech y el MIT.

Introducción general

1.- El estudio de la relatividad

El presente trabajo consiste en un estudio histórico-filosófico que analiza el desarrollo e integración de los diferentes elementos constitutivos de las prácticas científicas de medición, que dieron origen a la idea de la relatividad general y a la reformulación de los conceptos de espacio y tiempo que formó parte de este proceso. Dicho análisis abarca desde 1676, con las primeras observaciones que permitieron calcular el tiempo que requiere la luz para viajar una determinada distancia, hasta las observaciones del eclipse solar de 1919 que confirmaron la desviación de la trayectoria de la luz, debido a campos gravitacionales, que predecía la relatividad general de Albert Einstein. Entre estos eventos se produjo una serie de diferentes modificaciones en tres ámbitos de las prácticas de medición, concretamente, se generaron nuevas creencias sobre el mundo físico, logros técnicos notables y complejos desarrollos matemáticos. Estas modificaciones comenzaron como productos de operaciones independientes que, paulatinamente, generaron una nueva concepción del uso de instrumentos, de la matemática y de las ideas de espacio y tiempo capaz de integrar todos estos logros. En pocas palabras, el tema es el crecimiento del conocimiento del espacio y el tiempo que se generó mediante este proceso¹.

Hay una extensa literatura que ha abordado el estudio de las aportaciones científicas de Albert Einstein. En dicha literatura podemos encontrar tanto investigaciones guiadas por un interés principalmente histórico como investigaciones guiadas por intereses más bien filosóficos. Entre las investigaciones históricas está la conocida biografía de Einstein escrita por Abraham Pais publicada por primera vez en 1982 titulada '*Subtle is the Lord...*' *The Science and the Life of Albert Einstein*. Aunque se trata, principalmente, de una narración de la vida de Einstein, la investigación de Pais hace un particular énfasis en la exposición detallada de las contribuciones científicas de Einstein. En palabras de Penrose "Este libro fue seguramente la biografía que Einstein mismo hubiera valorado más. Dado que mientras Pais no rechaza el lado personal de Einstein (y una interesante imagen de Einstein el hombre, de hecho, emerge) la fuerza real de este trabajo yace en su manejo de las ideas físicas" (Penrose, 2005:vii-viii)². Con todo, Pais no lleva a cabo análisis extensos sobre el desarrollo de dichas ideas físicas, sino que, debido a su interés principalmente biográfico, sólo las presenta en la medida que las requiere para exponer los elementos que considera más relevantes en los principales artículos científicos de Einstein.

Entre los estudios históricos centrados en la física podemos resaltar los de Olivier Darrigol (1996, 2000, 2004, 2005) quien ha hecho especial énfasis en el papel que los estudios del siglo XIX en electromagnetismo tuvieron en el descubrimiento de la relatividad especial. En textos como *Electrodynamics from Ampere to Einstein* o *The Electrodynamical Origins of Relativity*

¹ Una guía heurística importante en esta investigación ha sido Guillaumin (2016)

² Del prefacio escrito por el prominente físico y matemático Roger Penrose para la edición de 2005 del libro de Pais.

Theory, él considera a la relatividad especial como parte del desarrollo de la electrodinámica más que de otras áreas de la física, sin por ello negar su relación con estas otras. Para Darrigol, los intentos de finales del siglo XIX por producir explicaciones adecuadas a los fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo, en el caso de cuerpos en movimiento, constituyen el contexto adecuado para buscar el origen de la relatividad especial. Uno de los aspectos que resalta es la similitud entre el trabajo de Einstein de 1905 y el de otros investigadores de la época como Alfred Bucherer, Joseph Larmor, Emil Cohn, pero principalmente Henri Poincaré y Hendrik Antoon Lorentz. Esto sin caer en excesos como los de la controversial investigación de Edmund Whittaker (1953) que atribuía la relatividad especial por completo a Lorentz y Poincaré, y consideraba que Einstein sólo había tenido un papel menor en el descubrimiento. Darrigol expone estas otras propuestas, señala sus méritos y su capacidad para dar cuenta de los fenómenos electromagnéticos así como su similitud con la propuesta de Einstein, pero sin perder de vista las diferencias relevantes.

Aunque Darrigol resalta el desarrollo de las explicaciones físicas, pone poco énfasis en los desarrollos técnicos y experimentales que pudieron estar relacionados al trabajo de Einstein. A este respecto, la investigación de Peter Galison (2005) ha mostrado la considerable influencia que el desarrollo tecnológico pudo tener en el trabajo de Einstein. En su libro *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré. Imperios del tiempo*, Galison señala que los avances del siglo XIX en la tecnología para coordinar relojes distantes, así como para determinar precisas distancias terrestres, tuvieron una gran importancia para científicos como H. Poincaré y Einstein. Antes del siglo XX no había manera de construir relojes que pudieran mantener la hora de un lugar determinado al ser transportados a otro sitio, por lo que la diferencia de horarios entre dos puntos lejanos era difícil de determinar. Conocer la diferencia de horarios era crucial para calcular la longitud terrestre, lo que a su vez, era necesario para trazar mapas precisos y una variedad de otras actividades prácticas. Galison expone cómo los trabajos de Poincaré en el *Bureau de Longitudes* de Francia se relacionaban con sus trabajos en física, de manera similar a cómo la relatividad de Einstein se relaciona al trabajo de éste en la oficina de patentes en Berna Suiza.

En cuanto al aspecto experimental, Gerald Holton (1969, 1985) ha reevaluado el papel que experimentos como el de Michelson-Morley tuvieron en el camino de Einstein hacia la relatividad especial. Él considera que la influencia del famoso resultado obtenido en el experimento de A. Michelson y E Moreley en 1887 para detectar los efectos del éter lumínico, que supuestamente llenaba el espacio, tuvo un papel más bien menor. Por otro lado, Holton considera que la manera en que otros investigadores, aparte de Einstein, habían tratado de explicar éste y otros resultados de la óptica y la electrodinámica era recurriendo a hipótesis *ad hoc* y hace una importante crítica del trabajo de Whittaker (1953). Las investigaciones de Holton han constituido un punto de partida para la mayor parte de los estudios históricos acerca de Einstein como el de Hon y Goldstein (2005), quienes llaman la atención sobre la manera en que Einstein inicia su artículo sobre la relatividad especial de 1905. En dicho artículo, Einstein se refiere a lo que considera una asimetría en la electrodinámica de la época que Holton (1969)

había tratado de explicar en términos de criterios estéticos que podrían formar parte del pensamiento de científicos como Einstein. Hon y Goldstein rechazan esta explicación y revisan los usos que los científicos de la época daban al concepto de simetría así como la manera en que lo usa Einstein. Ellos concluyen que lo que Einstein parece expresar al hablar de asimetría, en este caso particular, es que la electrodinámica generaba dos explicaciones diferentes e incompatibles para lo que parece el mismo fenómeno. Hon y Goldstein consideran que Einstein plantea el problema de una forma distinta, a saber, asume que las ecuaciones de la electrodinámica son correctas e identifica la asimetría como consecuencia de interpretaciones físicas inadecuadas y no de la forma de las ecuaciones.

Los trabajos mencionados hasta aquí, excepto el de Pais, se han centrado más bien en el estudio de la relatividad *especial*. Los primeros pasos de Einstein hacía la relatividad *general* han sido abordados, más extensamente, por autores como John Stachel, primer editor del *Einstein Paper Project* durante la publicación de los dos primeros volúmenes de *The Collected Papers of Albert Einstein*. Él mismo ha escrito artículos (Stachel, 1980, 2007) en los que investiga los motivos de Einstein para comenzar a considerar a las geometrías no euclidianas como un elemento clave para extender su relatividad especial al caso de los sistemas de referencia acelerados, es decir, para arribar a lo que ahora llamamos relatividad general. A este respecto, Stachel hace énfasis en el estudio que Einstein hacía de un caso concreto en que la relatividad especial parecía mostrar la necesidad de tomar en cuenta efectos geométricos que no eran compatibles con los que pueden producirse en geometría euclidiana; la “paradoja de Ehrenfest”. Para Stachel (1980, 2007) este caso representa un eslabón clave en el camino de Einstein hacia la relatividad general.

Por su parte, John D. Norton ha presentado el desarrollo de las ideas científicas de Einstein respecto de la relatividad de una manera clara y detallada abarcando tanto el origen de la relatividad especial como el de la general. Norton (2004, 2010) reconoce que existen pocos registros de la investigación de Einstein que lo llevó a la relatividad especial de 1905, pero retomando textos como cartas y comentarios posteriores de Einstein, así como otros documentos, Norton presenta argumentos convincentes para pensar que los primeros pasos de Einstein consistieron en una investigación de lo que se conoce como teorías de emisión. Además, Norton reconstruye los obstáculos que Einstein debió haber encontrado en esta aproximación y la manera en que los superó con su solución de 1905. Por otro lado, Norton (1984, 2007) aborda las investigaciones de Einstein en los años previos a 1915. Para ello, realiza un análisis notable del cuaderno de notas de Einstein (*Zurich notebook*) que había pasado desapercibido para la mayor parte de los historiadores de Einstein antes del *Einstein Paper Project*. Esto le permitió identificar la necesidad de corregir otros estudios históricos previos que se habían realizado acerca de los orígenes de la relatividad general.

Michael Janssen (2002) provee una explicación diferente de la de Holton para dar cuenta de la superioridad de la explicación de Einstein de 1905, sobre otras propuestas de la época, respecto de los fenómenos electromagnéticos de cuerpos en movimiento. Janssen no se apoya en

considerar a las otras propuestas como *ad hoc*, sino que hace énfasis en la capacidad que la propuesta de Einstein tenía para explicar correlaciones que en otras propuestas parecían meras coincidencias. En cuanto a la relatividad general, Janssen (2014) considera a ésta producto de los esfuerzos fallidos, por parte de Einstein, de crear una teoría que disolviera por completo la distinción entre sistemas de referencia inerciales y acelerados. Para él, el intento sólo es fallido en la medida que no logra disolver por completo esta distinción, pero reconoce que en el proceso hay una serie de descubrimientos notables, por lo que titula a su texto “*No Success Like Failure... Einstein’s Quest for General Relativity, 1907–1920*”.

Por otra parte, Jürgen Renn, en sus investigaciones publicadas en 2007 y en su trabajo conjunto con T. Sauer (Renn y Sauer 2007), lleva a cabo un estudio con un interés más bien filosófico. Renn utiliza conceptos de las ciencias cognitivas para desarrollar un entendimiento teórico de la construcción del conocimiento científico en el caso particular del camino de Einstein hacia la relatividad general. Para Renn, una combinación de recursos de conocimiento enraizados en la física clásica y la relatividad especial es lo que da lugar a la relatividad general, la cual ya no es compatible con ese conocimiento que formó el punto de partida. De manera que, Renn intenta explicar la creación de la relatividad general como originada mediante una transformación de los recursos cognitivos producidos por la física previa a Einstein. Dicha transformación se produce, de acuerdo con Renn, mediante una adaptación mutua entre las representaciones matemáticas y los significados físicos de las mismas.

Finalmente, Elie Zahar (1973a, 1973b) intenta utilizar la historia del surgimiento de la relatividad, especial y general, para poner a prueba la metodología de los programas de investigación de Imre Lakatos. Es decir, Zahar intenta mostrar hasta qué punto las ideas de Lakatos permiten entender el origen y desarrollo de la relatividad de Einstein como una competencia entre programas de investigación (como los entiende Lakatos). En particular, Zahar explica la manera en que las ideas de Einstein superaron a otras propuestas de la época mostrando como su programa de investigación superó al programa de H. A. Lorentz. De acuerdo con Zahar, esto sucedió debido a que, aunque Lorentz podía obtener predicciones empíricas similares a las de la relatividad especial de Einstein, la relatividad general se encuentra dentro del mismo programa de investigación que la relatividad especial y ésta (la relatividad general) si produce predicciones empíricas fuera del alcance de las teorías de Lorentz o de otros investigadores de la época. A pesar la notable calidad de la investigación de Zahar, el uso que hace de este caso ha recibido algunas críticas como la de Feyerabend (1974). Con todo, considero que, al igual que los otros trabajos que he mencionado, constituye un importante recurso en la investigación filosófica del surgimiento de la relatividad³.

³ Otras investigaciones que revisé han sido importantes recursos, pero no los expongo aquí porque, aunque fueron útiles como guía, no abordan el origen de la relatividad directamente. Un ejemplo es el libro de J. Canales (2015) que aborda la controversia entre Albert Einstein y el filósofo H. Bergson respecto del concepto de tiempo. O las que abordan casos muy específicos como el de McCormach (1980a y 1980b) que se centra en los trabajos de H. Hertz y H. A. Lorentz. Trabajos que sí abordan directamente la relatividad y que podrían aportar a la discusión son R. Staley

2.- Objetivo

Las aportaciones de la literatura mencionada proveen el punto de partida para plantear el objetivo principal del presente trabajo. Dicho objetivo consiste en responder a las siguientes preguntas: *¿Tuvieron algún papel relevante algunas mediciones científicas pre-einsteinianas en el surgimiento del concepto einsteiniano de espacio-tiempo? Si es afirmativa la respuesta ¿cuáles fueron esas mediciones y cómo influyeron? Si la respuesta es negativa ¿por qué no influyeron?*

Para responder a las preguntas mencionadas es necesario aclarar algunos aspectos de lo que consideraré *prácticas científicas de medición*. Tomando en cuenta que en filosofía de la ciencia no hay consenso sobre cómo caracterizar a las prácticas científicas, en general podemos decir que “las prácticas pueden entenderse como patrones de actividades con cierta estructura normativa y significativa que tiene lugar ya sea en el contexto de interacciones entre diferentes tipos de agentes y entornos o entre sujetos y ambientes externos” (Martinez y Huang, 2011:8). En particular, una práctica de medición busca proveer parámetros de los que no tenemos experiencia directa (por ejemplo, la velocidad de la luz), por lo que implicará, para los fines del presente estudio, un proceso que incluye el descubrimiento y perfeccionamiento de las operaciones concretas que los físicos realizaron con el fin de asignar cantidades a magnitudes físicas, así como de las operaciones de cálculo con las que tales magnitudes se relacionaban y de las concepciones ontológicas a las que ambos tipos de operaciones se asociaban. Dicho proceso también abarca la aplicación y, ocasionalmente, modificaciones de los criterios de corrección de las operaciones y concepciones mencionadas.

En la historia de la ciencia podemos encontrar prácticas científicas de medición implicadas en la investigación de una variedad de diferentes fenómenos naturales, las que analizaré son aquellas asociadas a conceptos relevantes para lo que ahora conocemos como relatividad especial y general, tales como las mediciones de distancias, tiempos, electricidad, magnetismo y velocidad de la luz. Examinar el desarrollo de las prácticas de medición de estos fenómenos requerirá tomar en cuenta las modificaciones paulatinas que, tuvieron lugar durante el periodo de tiempo que analizo. Considero que este desarrollo de las prácticas de medición incluye tres procesos principales; i) la búsqueda de métodos confiables para obtener *datos cuantitativos* de los fenómenos en cuestión, así como para corregidos y refinados, ii) la creación, el desarrollo y aplicación de nuevas *herramientas matemáticas* que permitieran, entre otras cosas, capturar las correlaciones entre dichos datos, y iii) la producción de *afirmaciones ontológicas* acerca del espacio, el tiempo y los conceptos de la física que permitieran integrar los anteriores.

Ahora, aunque el desarrollo de las prácticas de medición que consideraré tuvo implicaciones en distintas áreas de la física, por ejemplo, en la investigación del mundo microscópico, los aspectos que analizaré son los que estuvieron involucrados de manera más directa con el proceso

(2009), *Einstein's generation. The origins of the relativity revolution*, Schaffner (1972), *Nineteenth-century aether theories*, etc.

que dio lugar a los nuevos conceptos de espacio y tiempo que emergieron del desarrollo de la relatividad especial y general de Einstein hasta la obtención de los datos del eclipse de 1919. Así, aunque el surgimiento de la mecánica lagrangiana, hamiltoniana y, posteriormente, de la mecánica cuántica tuvieron un papel en la simplificación de cálculos y pueden generar diversas discusiones acerca del conocimiento físico del espacio y el tiempo, no analizo dichas discusiones aquí. Debido a que el tema central son los cambios que tienen lugar en la investigación que da origen a la relatividad, tampoco abordaré aspectos de la relatividad desarrollados posteriormente a este periodo. Es decir, por el lado histórico, me limitaré a analizar aquellos cambios en las prácticas científicas de medición que fueron más relevantes y que directamente estuvieron implicados en el origen de la relatividad especial y general. Por el lado filosófico, no abordaré discusiones tales como la del realismo científico, sino que me centraré en el estudio de los procesos mediante los cuales cambian las prácticas científicas en el caso específico que analizo.

Considero que esta investigación es relevante para la filosofía de la ciencia debido a que el análisis no se centrará en las explicaciones de los fenómenos naturales que los científicos producían, sino en las prácticas científicas de medición. Esto permite examinar la manera en que la ciencia cambia como parte de un proceso de transformación e integración entre componentes de la práctica científica tales como los *datos* (experimentales y observacionales), las *expresiones matemáticas* que, entre otras cosas, capturan las relaciones entre ellos y las *afirmaciones ontológicas* acerca de los fenómenos que son investigados, todo lo cual otros estudios no analizan adecuadamente. Esto hace posible identificar algunos aspectos del cambio en los conceptos científicos, como los de espacio y tiempo que se producen con la relatividad, que son filosóficamente relevantes, pero que se pierden en estudios que se centran en las explicaciones científicas y no en las prácticas. En otras palabras, una gran cantidad de investigaciones históricas (como la de Pais 1982 o Darrigol 1996, 2000, 2004 y 2005) y filosóficas (Zahar 1973a y 1973b) toman a las explicaciones físicas de los fenómenos como centrales en sus narraciones y dan un papel menor a otros aspectos de la práctica científica, considero que al hacerlo, a pesar de sus logros, pierden de vista características relevantes de los procesos de cambio que tienen lugar en la ciencia. Por ejemplo, cuando centramos el estudio en las explicaciones teóricas de los fenómenos, el papel de las hipótesis que los científicos plantean se ve reducido a ser verificadas o falseadas, pero, como se verá, cuando nos enfocamos en las prácticas de medición podemos reconocer que dichas hipótesis, aun cuando terminen por ser abandonadas, pueden jugar un papel más amplio al dirigir la investigación, de manera fructífera, en una dirección específica o motivar el desarrollo de nuevas técnicas experimentales. Algo similar ocurre con los experimentos y la observación científica en general. “La experimentación tiene vida propia” (Hacking, 1996:178). El reconocimiento de que estos elementos pueden tener un papel epistémico relevante ha generado que en las últimas décadas se produzcan una variedad de estudios históricos y filosóficos, sobre la ciencia, que toman la noción de práctica como central⁴. En el caso de la relatividad, podemos mencionar el caso de Galison (2005) o Renn (2007a, 2007b) que hacen

⁴ Por ejemplo; Kitcher (1993), Chang (2004, 2013), Tal (2013), Guillaumin (2016), etc.

énfasis en otros componentes de la práctica científica, además de la explicación de fenómenos, que fueron importantes para el origen de la relatividad. Con todo, considero que éstos no logran abarcar todos los aspectos relevantes que se pueden recuperar al considerar al surgimiento de la relatividad general como integración de los componentes de la práctica científica. En particular, no analizan detalladamente la manera en que las operaciones de medición contribuyeron a reformular lo que entendemos como espacio y tiempo, y cómo esto se relaciona con crecimiento del conocimiento científico⁵.

3.- Estructura

Para llevar a cabo el objetivo me propongo identificar el origen y desarrollo de las prácticas de medición que llevaron a reformular los conceptos de espacio y tiempo, la manera en que esto se hizo y cómo el hacerlo permitió producir explicaciones para una gran cantidad de fenómenos e, incluso, hacer predicciones acertadas de fenómenos previamente desconocidos. El proceso histórico abarcó diversas investigaciones, las cuales tenían intereses que, en una primera instancia, parecen poco relacionados con reconsiderar la manera en que entendemos al espacio y al tiempo, como los debates respecto del movimiento de la luz. Como veremos, estos debates resultaran cruciales para el desarrollo posterior. Es por ello que, en el primer capítulo, busco identificar los primeros resultados relevantes sobre la velocidad de la luz y las concepciones acerca de la luz que se produjeron junto con ellos. El capítulo inicia señalando cómo las observaciones astronómicas de los siglos XVII y XVIII parecían proveer un método para medir longitudes terrestres y cómo las reflexiones acerca de las dificultades que dicho método enfrentaba, llevaron a considerar que la velocidad de la luz era finita. Esta idea es reforzada por el estudio de un fenómeno conocido como aberración estelar. El capítulo continúa analizando algunos factores que impidieron que la luz fuera considerada como una onda producida en un medio mecánico durante el siglo XVIII y cómo la situación cambió a inicios del siglo XIX. Con la aceptación del carácter ondulatorio de la luz, también se aceptó la existencia de un éter lumínico en el que, supuestamente, se propagarían las ondas de luz. Este primer capítulo termina con el desarrollo de los primeros experimentos que utilizaban un fenómeno conocido como interferencia de ondas para estudiar el movimiento de la luz y poner a prueba las hipótesis que se habían generado sobre el éter. En pocas palabras, el primer capítulo muestra el origen de dos *concepciones ontológicas*; el carácter ondulatorio de la luz y la existencia de un éter lumínico, así como los métodos materiales que permitieron la obtención de aquellos *datos* en los que se

⁵ Respecto del crecimiento del conocimiento científico, considero que la reformulación de los conceptos de espacio y tiempo es motivada, en parte, por la búsqueda de eliminar *errores*, tales como la contradicción de los datos experimentales que mostraré en los capítulos 1 y 2. El *error* puede ser una noción difícil de caracterizar, pero Hon (1995) lo distingue de la *equivocación* y le atribuye un carácter epistémico. Para él, la búsqueda de elementos de la realidad que nos permitan identificar un *error* tiene el potencial de revelar nuevo conocimiento. Una caracterización más elaborada la podemos encontrar en Guillaumin (2016) para quien “Probar que algo es un error es una parte sustantiva del crecimiento del conocimiento métrico-cuantitativo del mundo físico y de sus prácticas que lo generan.” (Guillaumin, 2016:46).

apoyaban dichas concepciones de la luz y la búsqueda de nuevos *datos* con los que se buscaba resolver las controversias que éstas generaron.

El capítulo segundo tiene un objetivo triple, primero; mostrar los logros y dificultades con los que la investigación de la medición de la velocidad de la luz se había topado, segundo; señalar la integración de la óptica con la electrodinámica, y tercero; analizar los descubrimientos en matemáticas que se generaron de manera independiente, durante la misma época (siglo XIX). En este proceso, el electromagnetismo comienza a jugar un papel relevante, ya que, la luz comienza a ser considerada como una onda electromagnética. Algunos de los que fueron parte de este proceso de descubrimiento, como el físico y matemático C. F. Gauss, también previeron algunos elementos de los desarrollos en matemáticas, concretamente en el concepto de métrica utilizado en las geometrías no euclidianas. Sin embargo, ni los logros en electromagnetismo ni los nuevos avances en matemáticas permitieron resolver una dificultad en la caracterización del éter que cada vez de hacía más evidente. De hecho, el logro técnico más notable de la época, la aplicación experimental del interferómetro de A. Michelson, hizo más claro que nunca una aparente necesidad de atribuir cualidades contradictorias al éter para dar cuenta de los datos obtenidos hasta el momento.

El capítulo tercero muestra un intento de solución, que se presentó a finales del siglo XIX e inicios del XX, a las dificultades que la medición de la velocidad de la luz había encontrado, en particular, las características aparentemente contradictorias que debía tener el éter lumínico para explicar los datos obtenidos. Dicha solución fue propuesta por el físico H. A. Lorentz, quien, también, presentó versiones cada vez más acabadas de dicha solución durante los años 1886, 1892, 1895, 1899 y 1904. Posteriormente, H. Poincaré haría algunas críticas y daría la forma final a la propuesta con su artículo de 1906. Aquí encontraremos ya algunos elementos que suelen asociarse con la relatividad especial, como las transformaciones de Lorentz, al grado que se ha llegado a hablar de subdeterminación empírica cuando se analiza el caso de Lorentz vs Einstein. Sin embargo, veremos que el éter sigue siendo un elemento central y no hay modificaciones en la manera de entender el espacio y el tiempo. Analizar estas similitudes y diferencias es lo que permitirá identificar, con mayor claridad, los recursos de los que Einstein disponía, así como la novedad de su pensamiento en el siguiente capítulo.

El cuarto capítulo analiza el origen de la propuesta de Einstein de 1905, lo que ahora llamamos relatividad especial. En este punto, será claro que los datos producidos por las investigaciones acerca del movimiento de la luz habían hecho difícil caracterizar al éter y, al mismo tiempo, fueron haciendo cada vez más evidente la constancia de la velocidad de la luz. Esta constancia hizo posible que se considerara la adopción de nuevos estándares para medir distancias y tiempos. Pero, además, Einstein encuentra en dicha constancia una manera de redefinir lo que entendemos por espacio y tiempo. Como veremos, el espacio y el tiempo pasaron de ser componentes sustantivos de nuestra comprensión del mundo físico a ser relaciones definidas por operaciones de medición. A lo largo del capítulo se verá que esta reformulación de lo que entendemos como espacio y tiempo implicó una serie de modificaciones en la física que van desde la adopción de

nuevos criterios de evidencia hasta la eliminación de viejas categorías y distinciones e incluso del éter, de tal manera que el resultado es un planteamiento con categorías cualitativamente distintas a las anteriores y que permite relacionar adecuadamente datos, inicialmente desconectados, de la electrodinámica, la mecánica, la óptica y la metrología en una unidad.

Sin embargo, como veremos, tales cambios no eran completamente congruentes con todos los fenómenos conocidos e hicieron necesario llevar a cabo modificaciones en otras áreas, en especial en matemáticas. Los intentos de introducir las modificaciones adecuadas son el tema del capítulo quinto. El objetivo del capítulo es mostrar cómo fueron superados los obstáculos encontrados al tratar de capturar adecuadamente la nueva concepción de espacio-tiempo y cómo esto requirió nuevas expresiones matemáticas que, finalmente, lograron integrar los datos y las nuevas concepciones. El resultado de la integración mencionada permitió producir explicaciones y predicciones de datos previamente desconocidos o que resultaban de mecanismo que no se habían podido explicar. Esto fue posible gracias al desarrollo de las herramientas matemáticas que se explican en el capítulo dos y la nueva manera de entender al espacio y tiempo que los desarrollos del capítulo cuarto, lo que a su vez, fue posible como consecuencia de los logros que se analizan en los capítulos anteriores. En pocas palabras, el capítulo quinto retoma los logros alcanzados hasta el capítulo cuarto junto con los elementos que se habían desarrollado de manera independiente (como las herramientas matemáticas del capítulo dos) y muestra cómo su integración se logró en lo que ahora conocemos como relatividad general.

Capítulo 1

Midiendo la velocidad de la luz. La aberración estelar, la luz como onda, el éter y los experimentos de Fizeau.

Cuando estamos tratando de descifrar un objeto confuso y poco familiar, realizamos varios actos con el fin de establecer una nueva relación en él, tal que nos ayude a entenderlo,... Lo importante en la historia del conocimiento moderno es el refuerzo de estas obras activas por medio de instrumentos... Entre estas operaciones debemos incluir, por supuesto, aquellas que dan un registro permanente de lo que es observado y los instrumentos de medición exacta por medio de los cuales los cambios son correlacionados unos a otros. (J. Dewey, *The Quest for Certainty* 1929:87)

1.-Introducción:

El estudio científico de la luz comenzó mucho antes de que se llevaran a cabo las primeras mediciones de su velocidad. Los científicos investigaron los fenómenos lumínicos durante siglos midiendo parámetros tales como ángulos de reflexión o refracción de los rayos de luz. Sin embargo, medir la velocidad de la luz era relevante tanto para esclarecer su naturaleza como para identificar efectos ópticos que pudieran alterar nuestras percepciones de otros fenómenos. Con todo, llevar a cabo la medición de dicha velocidad resultó ser un gran desafío por mucho tiempo. De hecho, durante el siglo XVII no era del todo claro que la luz tuviera una velocidad finita. Al mismo tiempo, había poco consenso acerca de cómo caracterizar la naturaleza ontológica de la luz. Desde el siglo XVII, al menos, y hasta el XIX existieron dos concepciones acerca de la naturaleza de la luz, una asumía que la luz estaba compuesta por pequeñas partículas o corpúsculos (concepción corpuscular) y la otra que consistía en perturbaciones ondulatorias en un medio o éter (concepción ondulatoria). La concepción corpuscular llegó a ser dominante hasta inicios del siglo XIX cuando la ondulatoria ganó mayor aceptación. Estos cambios en la manera de entender la naturaleza de la luz estuvieron involucrados en el desarrollo de técnicas observacionales y experimentales que se llevó a cabo para medir nuevos parámetros de los fenómenos lumínicos, en especial, la velocidad de la luz. En el proceso también se fueron identificando las condiciones que podían alterar los resultados de tales mediciones. En pocas palabras, el desarrollo de la práctica de medición de la velocidad de la luz involucró una variedad de elementos que incluyen tanto logros técnicos notables como cambios en la concepción ontológica de la luz.

El objetivo de este capítulo consiste en rastrear el origen de la práctica de medición de la velocidad de la luz, la manera en que se fueron diseñando instrumentos experimentales con este fin, y los cambios en la comprensión de la ontología de la luz que estuvieron implicados en este proceso. Para ello comienzo el capítulo reconstruyendo las investigaciones y observaciones astronómicas de los siglos XVII y XVIII que, por primera vez, permitieron realizar cálculos

confiables del tiempo que a la luz le toma recorrer una distancia determinada. Después, continuó mostrando el desarrollo que permitió medir la velocidad de la luz, durante el siglo XIX, utilizando experimentos terrestres. Aunque el propósito no es reconstruir el surgimiento y desarrollo de las teorías sobre la luz, sino de aquellos elementos que contribuyeron a medir la velocidad de la luz, veremos que hubo importantes cambios en la manera de entender la naturaleza ontológica de la luz los cuales estuvieron involucrados en estos logros de medición.

Para referirme a la manera en que los científicos de una época dada concebían la naturaleza ontológica de la luz (y en general de aquellos componentes de la práctica científica que tienen que ver con la ontología) utilizaré el concepto de *principio físico* de Guillaumin (2016). Los principios físicos consisten en enunciados que “...se refieren *de manera altamente abstracta, idealizada y/o general* a objetos físicos, sus propiedades y/o sus relaciones con otros objetos” (Guillaumin 2016:64 énfasis del original). Así, me referiré a enunciados tales como “la luz se compone de partículas” o “existe un éter mecánico en el que se propagan las ondas de luz” como “*principios físicos*”. Como veremos, estos principios estarán en constante cambio durante el desarrollo de la práctica de medición de la velocidad de la luz. Sin embargo, también veremos que algunos de estos cambios resultaron inadecuados y no habrá una solución satisfactoria hacia el final del capítulo. Concretamente, no habrá una solución a los debates que se presentaron respecto de cuales principios físicos sobre la ontología de la luz debían ser aceptados.

El análisis de estas primeras etapas del desarrollo de la práctica de medición de la velocidad de la luz permitirá identificar qué aspectos eran insatisfactorios. Más concretamente, nos permitirá apreciar cuales principios físicos acerca de la naturaleza ontológica de la luz resultaron inadecuados hasta mediados del siglo XIX y porqué. Al mismo tiempo permitirá identificar los métodos observacionales y experimentales que resultaron exitosos y que permitieron establecer nuevas conclusiones confiables acerca de la velocidad de la luz y las condiciones que podían alterarla.

2.- La propagación finita de la luz.

Los primeros *datos*⁶ relevantes sobre la naturaleza de la luz que debemos tomar en cuenta son los que permitieron estudiar el fenómeno conocido como aberración estelar. Dicho fenómeno fue identificado mucho antes de que se produjeran los debates del siglo XIX en torno al éter, pero la investigación de éste es relevante porque los investigadores posteriores consideraron que cualquier concepción adecuada de éter debía proveer una explicación coherente del mismo. Se le llamó aberración estelar a un aparente cambio de posición en las estrellas que se aprecia al registrar las observaciones astronómicas producidas a lo largo de un año. Dicho movimiento se identificó en el siglo XVIII mediante una serie de investigaciones relacionadas con la búsqueda de un método para determinar, de manera precisa, la distancia geográfica en la que se encuentra un observador de una posición de referencia. Como mencioné en la introducción, fue tal

⁶ Por datos me referiré a “... observaciones, registros documentales de observaciones, mediciones directas realizadas con instrumentos, registros de tales observaciones etc.” (Guillaumin 2016:67)

necesidad la que generó diversos estudios astronómicos que, posteriormente, los científicos verían como evidencia de que la luz requiere tiempo para su propagación. Este movimiento de propagación, combinado con el movimiento de la Tierra, explicaría el mencionado cambio aparente de posición en las estrellas o aberración estelar. Para entender el proceso que generó esta conclusión debemos considerar el contexto de las investigaciones astronómicas y geográficas que llevaron a ella.

2.1- Previo al descubrimiento de la aberración estelar. El problema de la longitud terrestre.

Las primeras investigaciones exitosas acerca de la velocidad de la luz se originaron como parte de los estudios para localizar posiciones geográficas. Calcular una posición geográfica requiere saber tanto a qué distancia al norte o al sur se encuentra un observador de una posición de referencia como qué tan al este u oeste está de la misma. En cuanto a identificar que tanto se está al norte o al sur de una posición dada, es decir, la latitud, basta con observar la posición de los astros. Por ejemplo, si observamos la estrella polar sabemos que el norte está en su dirección, y si está muy cerca del horizonte sabemos que estamos cerca del ecuador, si, por el contrario, la estrella polar está casi sobre nuestras cabezas sabemos que estamos en el círculo polar. De manera similar podemos observar la altitud del sol⁷. Por otro lado, determinar qué tan al este o al oeste estamos de una posición inicial, lo que se conoce como longitud terrestre, requiere tener un reloj preciso que dé la hora en un meridiano de referencia, la longitud terrestre puede obtenerse con la diferencia entre la hora local y la hora en dicho meridiano de referencia. La razón por la que esto representó un reto, hasta antes del desarrollo de tecnologías que permitieran la comunicación a través de grandes distancias, es que no había relojes suficientemente precisos como para que conservaran la hora al ser transportados, de hecho, era un problema completamente sin resolver a inicios del siglo XVIII y lo siguió siendo hasta mucho después. “En el caso de John Harrison, el extraordinario relojero del siglo XVIII, los esfuerzos por construir un reloj de longitudes preciso en alta mar consumieron toda su vida. Por habil que fuera, Harrison no terminó con la búsqueda de un tiempo transportable.” (Galison 2005:111).

Una posible solución se había presentado en 1610 cuando Galileo Galilei (1564-1642), con ayuda de su telescopio, descubrió las lunas de Júpiter. Dicho descubrimiento podía usarse como un reloj preciso en el cielo. Estos satélites giraban alrededor de Júpiter en periodos regulares y podían ser observados desde lugares muy distantes al mismo tiempo. Por ejemplo, sabiendo que el satélite Io entraba y salía de la sombra de Júpiter en un periodo de cuarenta y dos horas y media, era posible hacer tablas precisas sobre este movimiento, de manera que, un observador puede calcular su distancia al este u oeste de un meridiano de referencia si sabe a qué hora se observa la salida de Io de la sombra de Júpiter en dicho meridiano y la hora a la que él observa

⁷Este ejemplo está simplificado por fines expositivos. Para que las observaciones de los astros permitan producir conclusiones precisas acerca de la latitud se requiere, entre otras cosas, el diseño y construcción de precisos instrumentos para identificar y registrar posiciones de cuerpos celestes. Además, se requieren registros sobre las variaciones de estas posiciones de los astros a lo largo de las estaciones, etc.

la misma salida. Es decir, la distancia se obtiene con la diferencia entre la hora a la que ocurre la salida en el meridiano de referencia y la hora a la que se observa en la posición a determinar. Sin embargo, el método presentaba algunas dificultades, por ejemplo, era prácticamente imposible observar las lunas desde la superficie de un barco en altamar puesto que el telescopio necesita estar fijo y el movimiento del mar no permite realizar las observaciones adecuadas. De acuerdo con Laugine (2012:1543) fue debido a esto que Galileo no ganó el premio prometido veinte años antes por el rey Felipe III de España a quien encontrara un método adecuado para determinar posiciones geográficas. Otra dificultad, posiblemente más importante, fue que el periodo de las lunas de Júpiter no parecía ser tan regular como se había esperado. Las lunas se adelantaban o atrasaban en su trayectoria alrededor de Júpiter de manera misteriosa. Esto causaba que las tablas para predecir su movimiento fueran poco precisas, lo que a su vez afectaba el cálculo de las distancias.

En 1676, Jean-Dominique Cassini (1625-1712) señaló una correlación entre las irregularidades de los periodos de las lunas de Júpiter y el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Él sugirió que las irregularidades podían explicarse si suponemos que la luz requiere tiempo para propagarse de Júpiter a la Tierra. Dicha idea era debatible en la época, anteriormente investigadores como Kepler habían defendido que la luz se propagaba de manera instantánea. Lo que proponía Cassini era que si observamos un periodo de una luna de Júpiter cuando la Tierra está en una posición cercana a Júpiter y luego observamos nuevamente el periodo cuando la Tierra se ha alejado entonces parecerá que hubo un retraso debido a que a la luz le toma tiempo recorrer la distancia extra. Cassini pronto abandonó esta idea debido a que los otros satelites presentaban perturbaciones que no parecía que se pudieran explicar así. Sin embargo, Ole Römer (1644-1710) retomó la idea de una propagación finita de la luz como explicación de las anomalías en el periodo de Io y calculó que si a la luz le tomara veintidos minutos atravesar el diámetro de la órbita de la Tierra, entonces las perturbaciones en el periodo de Io serían de esperarse. Esto hacía posible dar un cálculo aproximado del tiempo que le toma a la luz atravesar una distancia como la de la órbita de la Tierra, como explicó Christian Huygens (1629–1695).

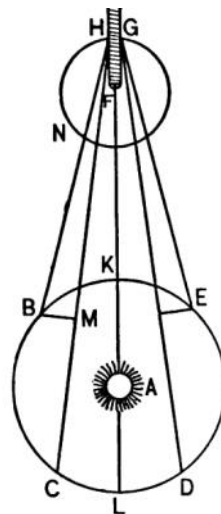


Figura 1.1- Diagrama hecho por Huygens para explicar el cálculo de Römer sobre el tiempo de propagación de la luz. Tomada de Treatise on Light 1960:14

Huygens usó los resultados de Römer para calcular, en su *Treatise on Light* de 1690, dicho tiempo de propagación de la luz. En la figura 1.1, Huygens considera al círculo que pasa por los puntos BCDE como la órbita de la Tierra, F representa a Júpiter, GN la órbita del satélite más cercano (Io), G el punto en que dicho satélite entra en la sombra de Júpiter y H el punto en el que sale. Huygens explica en su *Treatise* que si la Tierra permaneciera en el punto B sin moverse, entonces desde ella se vería que el satélite sale de la sombra de Júpiter cada 42 horas y 30 minutos. Pero, continua Huygens, si la Tierra en vez de quedarse en el punto B se mueve al punto C mientras el satélite da treinta vueltas alrededor de Júpiter, entonces la salida se observaría treinta veces 42 horas y media, más el tiempo extra que le toma a la luz recorrer la distancia MC. Con esta idea y los datos de las observaciones del periodo de Io, Huygens concluye que a la luz le toma 22 minutos viajar una distancia como KL (el diámetro de la órbita de la Tierra). Además, agrega que el dicha distancia (KL) es veinticuatro mil veces más grande que el diámetro de la propia Tierra y que aun si suponemos que sólo es veintidós mil veces más grande, esto equivaldría a que la luz viaja mil diámetros de la Tierra por minuto, es decir, que la luz se propagaría $16 \frac{2}{3}$ veces la distancia del diámetros de la Tierra en un segundo (Huygens, 1690:14-15).

2.2.- Aberración estelar

Sin embargo, la finitud de la propagación de la luz sólo fue mayormente aceptada hasta las investigaciones de James Bradley (1693–1722) en 1728. Bradley notó que la dirección de observación de una estrella fija parecía variar periódicamente, en el curso de un año. En particular, Bradley estudió la estrella γ -*Draconis* durante los últimos días de Noviembre y los primeros de Diciembre de 1725, al observarla nuevamente el 17 y 20 del mismo mes, la estrella parecía haberse movido al sur de su posición anterior. Bradley revisó los instrumentos, pero no encontró una causa para explicar este cambio. La estrella continuó moviéndose y para inicios de marzo de 1726 la estrella se había movido veinte segundos de arco al sur de su posición original. A mediados de abril, la estrella comenzó a regresar al norte y a inicios de junio estaba a la misma distancia del cenit de lo que estaba en diciembre. Sin embargo, la estrella continuó moviéndose al norte hasta septiembre, veinte segundos de arco más al norte que en junio. En diciembre la estrella regresó a la posición en que había sido observada por primera vez. Bradley consideró inicialmente que un movimiento en el eje de rotación de la Tierra para explicar este efecto, pero esto no explicaría porque el movimiento era diferente en distintas estrellas, en las que la cantidad de movimiento cambiaba. Bradley comenzó a estudiar el efecto en otras estrellas y a considerar diferentes hipótesis. Finalmente, Bradley explicó este fenómeno argumentando que, si a la luz le toma tiempo propagarse, la dirección aparente de la luz de la estrella cambia debido a que la Tierra está en movimiento también. El movimiento anual de la Tierra alrededor del sol hace parecer que una estrella dada cambia su posición a lo largo de un año. En lenguaje moderno, la posición aparente de la luz era resultado de una suma vectorial de su vector de velocidad verdadero y el del movimiento de la Tierra. Con ésta hipótesis y la distancia Tierra-Sol se puede

calcular el tiempo que le toma a la luz atravesar una distancia dada. Bradley calculó la proporción entre la velocidad de la luz y la de la Tierra a partir de su estudio de este efecto de movimiento en las estrellas y concluyó que la luz se propaga por una distancia como la que hay entre el sol y la Tierra en 8 minutos y 13 segundos (Bradley, 1728:655). Bradley comparó esta conclusión con las de Römer y señaló que, aunque el cálculo original de Römer para el tiempo de propagación de la luz en la misma distancia era de 11 minutos, otras correcciones en las observaciones de los satélites de Júpiter daban un tiempo de 7 minutos, por lo que él consideró que había un acuerdo suficiente entre los dos métodos. Finalmente, Bradley calculó los cambios de posición que otras estrellas debían presentar si su hipótesis era acertada y corroboró los resultados con otras observaciones. La coincidencia de su cálculo con el de Römer para el tiempo de propagación de la luz y el éxito al calcular los cambios de posición de otras estrellas permitieron establecer las conclusiones de Bradley como una explicación adecuada de la aberración estelar. Sin embargo, hay que notar que Bradley, al igual que Huygens y Römer, no da, explícitamente, un valor para la rapidez de la luz, ellos señalaban únicamente el tiempo que le tomaba a la luz recorrer una distancia dada. Posiblemente la concepción de que la luz tiene velocidad aun estaba comenzado a ser asimilada (Cfr. Laugine, 2012:1546-1547)⁸.

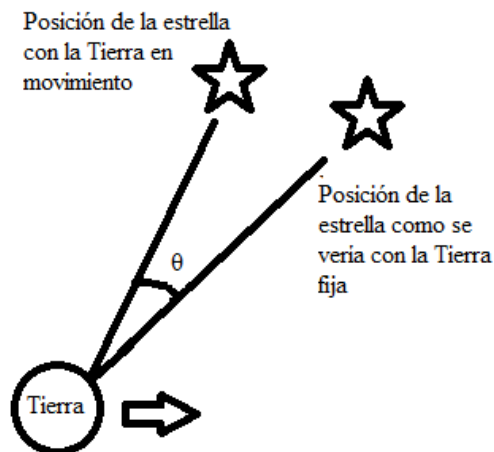


Figura 1.2- Aberración estelar debido al movimiento de la Tierra.

Como se verá, la importancia del descubrimiento de este fenómeno radica, principalmente, en que cualquier principio físico que considere un medio en que viaje la luz deberá dar cuenta de este efecto. Es decir, uno de los primeros retos de las propuestas acerca de, por ejemplo una concepción ondulatoria de la luz, era explicar si el hecho de considerar que hay un éter en el que

⁸ Dar un valor explícito sólo requiere un cálculo sencillo que consiste en dividir el valor de la distancia que sería el diámetro de la órbita de la Tierra entre el tiempo calculado por Bradley para la propagación de la luz esa misma distancia. El tamaño de la órbita de la Tierra había sido estimada por Cassini y Jean Richer (1630-1696) en 1671-1672, El resultado para la velocidad de la luz será tan preciso como lo sean estas dos magnitudes (el tamaño de la órbita de la Tierra y el tiempo de propagación). De manera que todos los cálculos de la velocidad de la luz dependerán de la precisión de la mediciones astronómicas (como las del diámetro de la órbita de la Tierra) hasta el siglo XIX.

se propaga la luz requiere cambiar o no la manera en que Bradley da cuenta de la aberración estelar y de qué manera. La mayoría de los investigadores posteriores optaron por caracterizar al éter de tal manera que pudiera conservarse la explicación de Bradley de la aberración estelar.

3.- Debates respecto de la aceptación del éter durante el siglo XVIII e inicios del XIX.

Desde antes de los trabajos de Bradley y durante el siglo XVIII la luz fue considerada, por la mayoría de los investigadores, como constituida por corpúsculos. También existieron quienes, como Huygens, propusieron entender a la luz como onda, pero dicha idea implicaba considerar un éter en el que se propagara y durante el siglo XVIII parece haber existido cierta resistencia a especular sobre algo completamente inobservable como un éter. Laudan (1981) señala que, después del triunfo de la mecánica newtoniana muchos investigadores habían concluido que la ciencia debía evitar postular hipótesis y limitarse a aquello que puede establecerse por inducción a través de la observación: “Donde miremos de Berkeley y Hume en Bretaña a 'sGravesande y Musschenbroek en los Países Bajos, o a Condillac y D' Alembert en Francia, el refrán era similar: sistemas especulativos e hipótesis son ociosas; las teorías científicas deben lidiar exclusivamente con entidades que pueden ser observadas o medidas...” (Laudan 1981: 112).

De acuerdo con Laudan (1981) los planteamientos más importantes que se hicieron durante el siglo XVIII acerca de un medio etéreo que explicara la transmisión de la luz fueron los de David Hartley (1705-1757) and George LeSage (1724-1803). Pero ellos no podían recurrir a ninguna evidencia directa, por lo que necesitaban argumentar a favor de la postulación de hipótesis que refirieran a entidades inobservables como una manera legítima de producir conocimiento verdadero sobre la naturaleza. Hartley trató de hacer esto en su obra *Observations on Man*, pero sin mucho éxito. Lo que propuso fue una especie de abducción del tipo: “tenemos un fenómeno x” (x sería las propiedades de la luz) y “si hubiera un éter entonces x”, por lo tanto, probablemente, hay un éter. Estas ideas no fueron bien recibidas y Laudan (1981:114-115) atribuye este fracaso a que la metodología abductiva que proponían fue reconocida como una forma de falacia formal conocida como afirmación del consecuente. En lenguaje moderno, la falacia en cuestión se explica de la siguiente manera; un argumento que a partir de las premisas “A implica B” y “B” llega a la conclusión “A” se le considera falaz porque la verdad de ambas premisas no implica la verdad de la conclusión⁹. Para poder postular una concepción ondulatoria de la luz y, con ella, la existencia de un éter lumínico, hacía falta encontrar un criterio que permitiera establecer las circunstancias bajo las cuales una hipótesis que postula un mecanismo inobservable debiera ser creída o aceptada. Hartley sólo requería que una hipótesis tuviera

⁹ Por ejemplo; 1.- Si ‘estoy en México’ entonces ‘estoy en América’
2.-‘Estoy en América’
C.-‘Estoy en México’

Se considera falaz porque, aun si 1 y 2 son verdaderas, esto no permiten concluir que necesariamente sea verdad c. Uno podría encontrarse en Colombia de manera que 1 y 2 serán verdaderas y no será cierto c. Para muchos de los científicos del siglo XVIII aceptar la existencia de un éter inobservable implicaba aceptar como verdadera la conclusión de un razonamiento de este tipo. De manera que, decir que si el éter existe entonces se explican los fenómenos lumínicos observados, no era razón suficiente para pensar que, de hecho, hay un éter.

alcance explicativo lo cual no resultaba muy útil debido a que muchas hipótesis sobre la naturaleza que habían sido rechazadas, como la física de Descartes o la astronomía de Ptolomeo, pueden modificarse de manera *ad hoc* para dar cuenta todos los fenómenos conocidos.

La situación cambió a inicios del siglo XIX, en parte debido a los logros de Thomas Young (1773-1829), pero principalmente a los de Augustin Fresnel (1788-1827). Las hipótesis que ambos propusieron acerca de la naturaleza de la luz como onda estuvieron ampliamente apoyadas por resultados experimentales. Sin embargo, en el caso Young, “su método favorito era la analogía, complementado con razonamientos experimentales y geométricos” (Darrigol, 2012:173). Su investigación consideraba a las analogías entre la luz y el sonido como una base sólida para la inferencia en física, con lo que obtuvo un escaso éxito inicial. Probablemente, dicha metodología fuera una de las razones que hicieron que sus conclusiones recibieran poco apoyo antes de las aportaciones de Fresnel (Cfr. Darrigol, 2012:187). El caso de este último fue diferente debido, en parte, al experimento Fresnel-Poisson. Dicho experimento fue propuesto por Siméon Denis Poisson (1781-1840) en respuesta a un artículo de Fresnel de 1816 en el que éste abordaba la difracción considerando a la luz como una onda en un medio. Poisson, detractor de dicha postura, concluyó que el estudio de Fresnel implicaba que en el centro de la sombra de un disco circular, proyectada a una determinada distancia, debía aparecer un punto luminoso. Poisson asumía que era improbable que esto sucediera por lo que presentaba este argumento como una refutación de las ideas de Fresnel, pero cuando el experimento se llevó a cabo el punto luminoso, de hecho, apareció en el centro de la sombra. Este resultado reforzó las conclusiones acerca de la naturaleza ondulatoria de la luz, pero además Laudan (1981) considera que esto permitió encontrar un criterio para evaluar hipótesis, lo que establecía una nueva metodología, a partir de este momento: “... una hipótesis que exitosamente pudiera predecir futuros estados de cosas (particularmente si esos estados eran ‘sorprendentes’), o si explicaban fenómenos para los que no había sido específicamente diseñada para explicar, adquiriría una legitimidad que las hipótesis que meramente explicaban lo que ya era conocido generalmente no poseían”. (Laudan, 1981:127-128). Así, mientras que en el siglo XVIII la mayor parte de los investigadores esperaban que las conclusiones verdaderas sobre la naturaleza se establecieran mediante la inducción a partir de la observación directa los fenómenos, los defensores de quienes especulaban sobre mecanismos inobservables que pudieran subyacer a los fenómenos proponían un método que estableciera la verdad de una hipótesis mediante el alcance explicativo, a esto se le ha conocido como método de hipótesis. En otras palabras, para utilizar esta metodología basada en la postulación de hipótesis, era necesario un criterio que permitiera discriminar entre las hipótesis que se proponían para un determinado fenómeno. Dicho criterio fue adoptado durante inicios del siglo XIX, en el contexto de los estudios sobre el éter, y consistió en evaluar tanto la capacidad predictiva de la hipótesis como su capacidad para explicar fenómenos para los que no había sido diseñada. Este proceso no fue instantáneo, pero con el tiempo la metodología de hipótesis fue imponiéndose a lo largo del siglo XIX y permitió la emergencia de nuevos debates acerca de la naturaleza de la luz y el éter. A partir de esta época el principio físico que enuncia que “la luz es una onda que se propaga en un medio” fue aceptado junto con los criterios epistemológicos en

que se apoyaba. Una consecuencia de esto fue que, a partir de entonces, se buscó justificar principios físicos sobre el éter mostrando su capacidad para adelantarse a nuevos datos experimentales u observacionales.

4.- El principio físico del éter en sus dos versiones más relevantes, la de Fresnel y la de Stokes

A partir del establecimiento del principio físico que consiste en la concepción ondulatoria de la luz, se asumía que un medio, posiblemente sólido (dado que la luz sólo consistía en perturbaciones transversales), debía existir para permitir la propagación de la luz. La razón por la que resultó infructuoso esclarecer las cualidades de dicho éter es que algunos fenómenos conocidos, y los resultados de diversos experimentos, parecían señalar que el éter debía tener ciertas características, como moverse con independencia de la materia, mientras que otros fenómenos y experimentos parecían señalar características opuestas y no parecía que pudiera encontrarse una hipótesis que pudiera explicar todos los fenómenos observados. Este dilema comenzó cuando se propusieron hipótesis diferentes sobre las del éter para buscar después efectos que sólo pudieran explicarse con una de las alternativas. Las dos propuestas que más se acercaron a lograr dar cuenta de la evidencia que se fue generando con este fin fueron, en primer lugar, la de Young y Fresnel, y en segundo lugar, la de Stokes.

Por su parte, Fresnel y Young consideraban que, dado que la luz parecía comportarse sólo como onda transversal, que suele presentarse en medios sólidos, y no como onda longitudinal, que se presenta en los fluidos, el éter debía ser una especie de sólido elástico que los objetos materiales, como los planetas, eran capaces de atravesar sin perder movimiento. Además, consideraron que difícilmente sería posible conservar la explicación que Bradley había dado de la aberración estelar si se pensaba que el éter se movía junto con la Tierra, a la manera que el aire y los gases de la atmosfera lo hacen, pues esto alteraría la trayectoria de la luz proveniente de las estrellas al acercarse a la Tierra de maneras impredecibles. De lo anterior, concluyeron que el éter debía ser transparente a la materia, es decir, la materia no afectaría al movimiento del éter. De esta manera, Fresnel y Young pensaban que sin importar cuánto se moviera un objeto material, aun si era tan masivo como la Tierra, el éter permanecería inalterado en su movimiento. Esta conclusión permitía seguir explicando la aberración estelar como consecuencia del movimiento de la Tierra y de la luz, a la manera de Bradley. Al no interactuar con la materia, el éter no alteraba las explicaciones previas sobre la aberración estelar.

Sin embargo, Dominique François Jean Arago (1786-1853) señaló un problema con la concepción ondulatoria de Fresnel y Young. Arago era secretario del Bureau de Longitudes en Francia, contribuyó al trabajo de dicha institución por más de cuarenta años e incluso participó personalmente en algunas expediciones geodésicas. Mientras participaba en estos proyectos hizo diversas contribuciones a la ciencia, en particular a la concepción ondulatoria de la luz. Arago, por ejemplo, había contribuido a los estudios de Fresnel sobre la difracción y la interferencia en 1815 y 1816, además había llevado a cabo el experimento que corroboró la predicción del punto

luminoso hecha por Fresnel. La dificultad que ahora señalaba era resultado de su intento de buscar alteraciones en la refracción de un prisma debido al movimiento anual de la Tierra, lo que debería ocurrir si el éter fuera completamente estacionario o inalterado por la materia, ya que, al moverse la Tierra alrededor del sol, primero en una dirección y luego en otra, cambiaría la dirección del viento del éter. De la misma forma que al moverse una persona a una alta velocidad siente el efecto del viento, así también el éter generaría un efecto de viento similar si la Tierra se mueve dentro de él. Dicho efecto de viento debía generar algún cambio en el movimiento de la luz. Sin embargo, dicho cambio debía ser muy pequeño dado que la velocidad de la Tierra es bastante lenta en comparación con la velocidad de la luz y difícilmente existían experimentos con la precisión suficiente para mostrar si había un efecto. En particular, Darrigol (2005:3) duda que Arago tuviera los recursos materiales para concluir que la refracción no era afectada, pero Fresnel tomó en serio dicho señalamiento y postuló un arrastre parcial del éter tal que evitaba cualquier efecto en las leyes de refracción que pudiera ser detectado con las mediciones que podían producirse en la época. La idea de Fresnel era que si aceptamos que la materia transmite sólo un pequeño porcentaje de su movimiento al éter, entonces aun podemos conservar la explicación de Bradley de la aberración estelar y, al mismo tiempo, explicar que los efectos del viento de éter sean tan pequeños como para que no pudieran ser detectados. Para ello, Fresnel concluyó que la materia no transmitía más que una centésima parte de su movimiento al éter, dicho efecto estaría dado por lo que ahora se conoce como coeficiente de arrastre de Fresnel. Dicho coeficiente $1-1/n^2$ se justificaba considerando que el flujo de éter se conserva y que la densidad del éter es inversamente proporcional al cuadrado de la propagación de la luz en un medio material dado¹⁰. Así, Fresnel pudo responder al señalamiento de Arago y preservar una explicación simple de la aberración estelar. En resumen, Fresnel concebía el éter como un medio que llenaba el espacio y que atravesaba a la materia, pero de manera que ésta “no comunica a este fluido más que una parte muy pequeña de su movimiento...” (Fresnel, 1818:59).

A pesar de lo anterior, no todos estaban satisfechos con la explicación de Fresnel, en particular un profesor de Cambridge llamado George Gabriel Stokes (1819-1903) criticó la postura de Fresnel en 1846. Stokes había hecho investigaciones importantes en hidrodinámica, una de ellas sobre la interacción del movimiento de un péndulo y el aire que lo rodea. “La investigación hidrodinámica de Stokes y su visión del éter como un sólido elástico hicieron clara su reacción negativa al concepto de éter de Fresnel” (Wilson, 1972:63). Para Stokes parecía poco natural la idea de que objetos tan masivos como la Tierra y los planetas pudieran moverse libremente sin afectar al éter. Debido a esto, Stokes postuló una hipótesis en la que consideraba al éter como una sustancia que se comportaba como un fluido incompresible bajo movimientos lentos de los cuerpos sumergidos en él, pero que era rígido bajo vibraciones rápidas como las de la velocidad de la luz. Así la Tierra se movería dentro del éter el cual actuaría como un líquido perfecto irrotacional, de manera que la propagación de la luz seguiría siendo rectilínea en el éter. Así, se

¹⁰ Poco después se cuestionó esta justificación teórica del coeficiente de arrastre. Sin embargo, los experimentos posteriores parecían corroborarlo (como se verá). Décadas después, Lorentz logró dar dicha justificación teórica en el marco de las hipótesis del éter atribuyéndolo a una consecuencia de la interacción entre los electrones y el éter.

puede seguir explicando la aberración estelar de manera similar a la de Bradley. Stokes consideraba, además, que el éter se adhería a la Tierra, de manera que, hasta cierta distancia del suelo, la Tierra tendría una velocidad nula relativa al éter que lo rodeaba. Con esto, Stokes fue capaz de explicar la ausencia de efectos del movimiento de la Tierra a través del éter. Sin embargo, al final sus ideas no daban cuenta de los datos mejor que las de Fresnel como él mismo reconoció: “tampoco he sido capaz de obtener un resultado, admisible de ser comparado con experimentos, que fuera diferente de acuerdo a qué teoría se adopte” (Stokes, 1846:147).

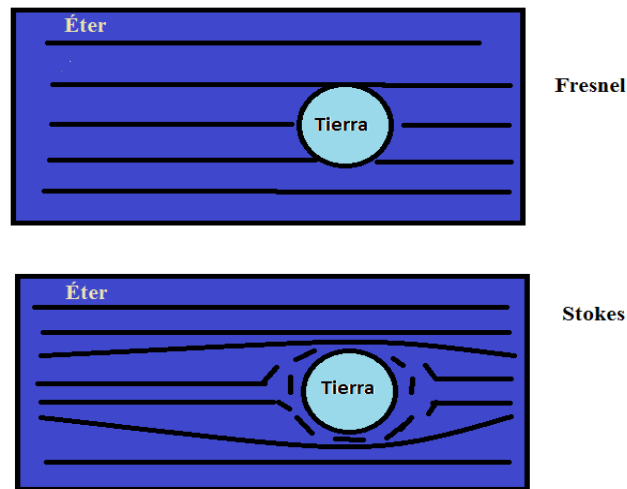


Figura 1.3- Las dos hipótesis principales sobre la naturaleza del éter eran la de Fresnel y la de Stokes.

Durante gran parte del siglo XIX el debate relacionado al éter consistió en establecer si el principio físico del éter debía ser como el propuesto por Fresnel o como el de Stokes. Ambas propuestas parecían dar cuenta de los fenómenos conocidos y no parece que hubiera claras razones para optar por una en particular. En años siguientes se diseñaron experimentos, como el de Fizeau, con el fin de encontrar datos que sólo fueran fácilmente conciliables con una de las propuestas y permitieran escoger entre la concepción de éter de Stokes y la de Fresnel, pero dichos experimentos contribuirían, de manera frustrante, a una mayor confusión.

5.- Los experimentos de Fizeau

Para mediados del siglo XIX la naturaleza ondulatoria de la luz era mayormente aceptada, pero las propiedades que el éter debía presentar y la manera en que se debía producir su interacción con la materia seguían siendo debatidas. El experimento más sobresaliente que se diseñó para generar datos que pudieran decidir la cuestión fue el realizado por Armand Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896), en 1851, con luz a través de agua en movimiento. Dicho experimento se hizo para determinar si la materia podía transmitir su movimiento a la luz y de qué manera. Fizeau fue alumno de Arago y también miembro del Bureau de Longitudes de Francia. Muchas de las investigaciones experimentales de Fizeau surgieron en continuidad con las de Arago, de hecho, en la publicación de los resultados de su experimento de 1851, Fizeau,

atribuye a Arago la idea de utilizar el fenómeno de interferencia para determinar las variaciones en la velocidad de la luz. En otras palabras, esta continuidad entre Arago y Fizeau puede verse en el desarrollo de las técnicas experimentales que emplearon, comenzando desde las investigaciones de Arago sobre interferencia, siguiendo con la investigación sobre el movimiento de la luz a través de medios transparentes, hasta los experimentos de Fizeau sobre la velocidad de la luz y, finalmente, el experimento sobre el movimiento de la luz dentro de agua en movimiento. Dada la importancia que el experimento de Fizeau tendrá en los debates sobre el éter, expondré brevemente estas investigaciones.

5.1.- La investigación de Arago sobre el fenómeno de interferencia en la luz

Como se ha mencionado, Arago había contribuido con Fresnel en sus estudios para establecer el carácter ondulatorio de la luz. Concretamente, a inicios de 1816, Arago había publicado un trabajo titulado *Note: Sur un Phénomène remarquable qui s'observe dans la diffraction de la lumière* en el que relaciona la interferencia con la velocidad de la luz. El artículo comienza señalando los experimentos de Thomas Young de 1803 en los que éste había mostrado como, al hacer pasar luz junto a los bordes de un cuerpo opaco, se obtiene una refracción de la luz tal que se divide en franjas luminosas y oscuras, además, mostró que bastaba tapar uno de los lados con una pantalla opaca para eliminar el efecto. En pocas palabras, Arago explica que Young había establecido algunas de las condiciones necesarias para observar este fenómeno y él se proponía continuar investigando dichas condiciones. A continuación, Arago describe un experimento con el que buscaba observar lo que ocurría en las franjas al cubrir los lados de un objeto opaco con vidrios transparentes de distintos grosores. Cada vez que aumentaba el grosor del vidrio, las bandas no desaparecían, sino que se separaban a intervalos similares dependiendo del grosor del vidrio. Además, observó que si uno de los lados tenía un vidrio con espesor distinto al del otro, las franjas se separaban la misma distancia que si se usaba un único vidrio con espesor igual a la diferencia de los anteriores. Arago concluyó que todas estas observaciones podían explicarse con la hipótesis de luz ondulatoria de Fresnel, pero que era necesario considerar que la luz viajaba más lento dentro del vidrio que dentro del aire. La interpretación era que las franjas se formaban como resultado de una propiedad ondulatoria, de una interferencia de ondas (Figura 1.4). Al unirse dos ondas mecánicas similares, éstas pueden formar una tercera con mayor amplitud si la fase coincide o con menor amplitud si no coinciden. Esto genera que dos ondas similares producidas en puntos diferentes interferirán entre sí de manera constructiva en unos puntos y destructiva en otros. Si consideramos que la luz es una onda y que cada lado de un objeto es una fuente de onda, las franjas de luz pueden explicarse como puntos en los que las ondas de luz interfieren de manera constructiva y las sombras como puntos en los que interfieren de manera destructiva. La distancia entre las franjas cambiaría en el experimento de Arago debido a que el vidrio retrasaría la propagación de las ondas de luz.

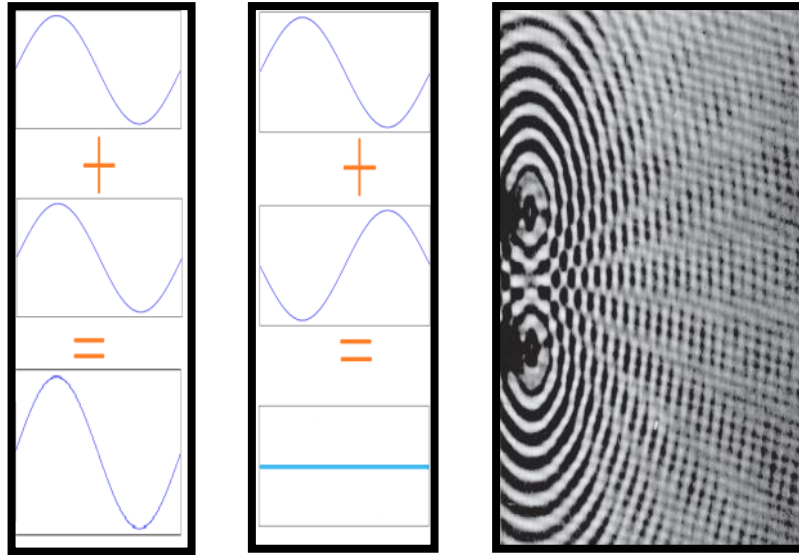


Figura 1.4- De lado izquierdo se muestra la interferencia constructiva, las ondas cuyos puntos máximos y mínimos coinciden dan como resultado, al combinarse (la de arriba con la de abajo), una onda de mayor amplitud. Al centro se muestra la interferencia destructiva, la combinación de ondas en la que un máximo coincide con un mínimo y un mínimo con un máximo da como resultado una disminución en la amplitud. A la derecha el patrón de interferencia producido por ondas en agua que interfieren de manera constructiva en los puntos en que se ven las ondas con mayor claridad y destructiva en los puntos en que no se ve. (Esta última imagen tomada de Resnick et al, 1999, Física Vol.2, pág 396).

5.2- Arago y Fizeau sobre el movimiento de la luz a través del agua

Las investigaciones de Fizeau sobre el éter y la luz comenzaron a partir de una propuesta experimental que Arago había planteado en 1838 para demostrar que la luz cambia su velocidad dependiendo de la densidad del medio en el que viaja. El dispositivo requería dirigir un rayo de luz a un espejo que rotara tan rápido como fuera posible, a continuación la luz proveniente del espejo rotante se reflejaría hacia el mismo plano por un espejo fijo a una determinada distancia. Para el momento en que la luz ha regresado el espejo giratorio habría cambiado su posición por un pequeño ángulo θ , lo cual cambiaría la dirección del rayo por el mismo ángulo respecto a la dirección original. Adicionalmente se dividiría el rayo que regresa del espejo de manera que uno de ellos se hace pasar a través de un tubo de agua, con lo cual se puede establecer si la luz que ha pasado por el agua se ha hecho más lenta sin tener que conocer su velocidad absoluta. Si el rayo que pasa por el agua regresa más lento llegaría una fracción de segundo después, al espejo rotante, que el que pasa por aire, por lo que se reflejarían ángulos diferentes (Figura 1.5).

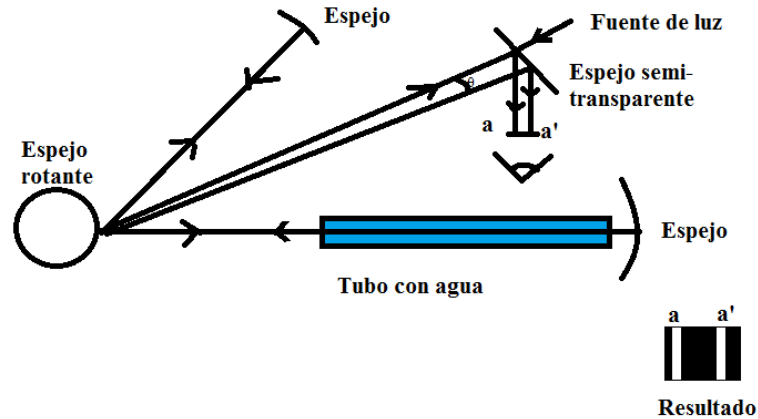


Figura 1.5- Dispositivo experimental propuesto por Arago y corregido por Fizeau y Foucault para identificar si la luz cambia su velocidad al pasar por medios más densos que al pasar por otros menos densos.

Con todo, Arago no pudo realizar este experimento debido a sus problemas de visión y a problemas técnicos como el de conseguir un rayo de luz que no se dispersara al pasar entre los espejos. Fizeau, en colaboración con Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), logró superar los problemas técnicos mediante un lente reflector convergente de distancia focal apropiada. Fizeau y Foucault tuvieron una disputa personal y continuaron sus trabajos de manera independiente presentando sus resultados en 1850. Ambos concluían que la luz sí se ve afectada por la densidad del medio en que viaja (Cfr. Gouch, 1980:18-21).

5.3- Midiendo la velocidad de la luz

Su trabajo con el dispositivo propuesto por Arago y la solución de los problemas técnicos que había requerido, como el de evitar que el rayo de luz se dispersara, le permitió a Fizeau concebir, en 1849, un mecanismo para medir la velocidad absoluta de la luz, es decir, el tiempo que le toma recorrer una distancia dada. A diferencia del experimento anterior, en el que sólo se mostraba si había variaciones de velocidad de un medio a otro, Fizeau se proponía obtener el valor de la velocidad con la que la luz viajaba en el aire. El dispositivo que concibió consistía en una rueda dentada que giraba rápidamente sobre su eje y un rayo de luz enviado al espacio entre los dientes se reflejaba a su fuente por un espejo fijo. Cuando la rueda girara suficientemente rápido los rayos intermitentes regresaban del espejo interceptando el camino de los dientes por lo que se harían invisibles a un observador situado detrás de la rueda (Figura 1.6). Al hacer girar la rueda más y más rápidamente la luz desaparecería y reaparecería alternativamente. Así, el tiempo requerido por la luz para viajar una distancia sería una función del desplazamiento angular de la rueda. En otras palabras; consideramos Δs la distancia entre el espejo y la lámina semitransparente, con n dientes y n brechas en la rueda dentada, de manera que la circunferencia de la rueda está dividida en $2n$ partes, entonces el tiempo para que un diente ocupe la posición de una brecha es $\Delta t = (1/2n)/w = 1/(2nw)$, con w la velocidad angular conocida por Fizeau. Ahora, si dicha velocidad angular es tal que eclipsa la luz, entonces la velocidad de la luz puede

determinarse a partir de $c = 2\Delta s/\Delta t = 4n\Delta sw$. De esta manera, Fizeau obtuvo la primera medición terrestre de la velocidad de la luz (Fizeau, 1849:90-92). En 1862, Foucault realizó su propia medición de la velocidad de la luz adaptando el método del experimento anterior (el descrito en 5.2) con un mecanismo mejorado para hacer rotar al espejo y encontró un valor un poco menor al de Fizeau (Cfr. Burstyn, 1980: 84-86).

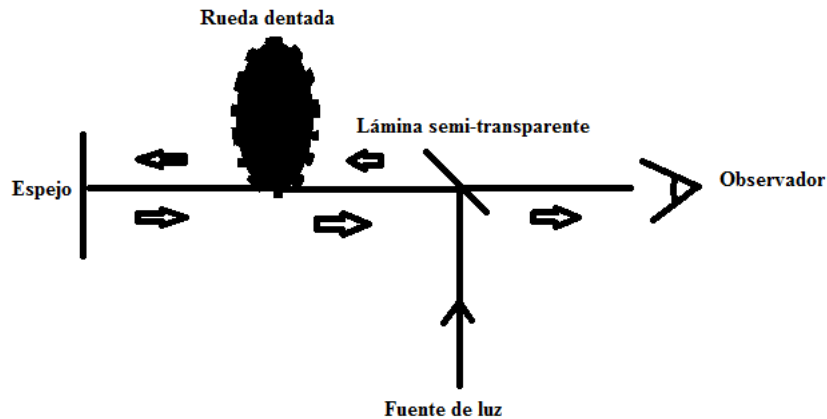


Figura 1.6- Experimento de Fizeau para determinar la velocidad de la luz.

Así, por primera vez fue posible obtener un valor para la velocidad de la luz que no requería de observaciones astronómicas, como en el caso de Bradley. Esto era relevante porque, para entonces, se habían generado dudas acerca de la precisión de tales observaciones. Canales (2009) muestra como los científicos del siglo XIX habían identificado discrepancias en los registros que diferentes astrónomos tomaban de los mismos fenómenos. Estas discrepancias se atribuían a la incertidumbre que introducía el tiempo de reacción de los astrónomos. Es decir, al tiempo que le toma al ser humano registrar un estímulo, tal como una observación. Se habían hecho diferentes intentos por eliminar este efecto “A pesar de todo, cronometrar el momento de contacto entre dos cuerpos celestes probó ser tan difícil que algunos científicos, incluyendo al psicólogo-físico Joseph Delboeuf, llegaron a creer en una discontinuidad esencial en la percepción” (Canales 2009:114). Los cálculos de Fizeau y Foucault (y las revisiones posteriores de Alfred Cornu) ofrecían la oportunidad de utilizar la velocidad de la luz para calcular parámetros astronómicos, como la distancia de la órbita de la Tierra, a partir de la velocidad de la luz¹¹. Un procedimiento como este tenía la ventaja adicional de que permitía prescindir de las costosas expediciones que los astrónomos necesitaban hacer para tomar las observaciones que les permitieran calcular los parámetros que buscaban. Pero para que esto fuera posible era necesario determinar si el éter afectaba al movimiento de la luz a través del sistema solar y de qué manera, ya que si el movimiento de los planetas afectaba al éter, éste, a su vez, afectaría la velocidad de la luz en el

¹¹ Al inverso que en los cálculos tradicionales (basados en métodos como los de Romer y Bradley) que partían de los parámetros astronómicos para calcular la velocidad de la luz.

espacio por lo que dicha velocidad no necesariamente sería la misma que la observada en los experimentos en Tierra (como los de Fizeau).

5.4- El experimento sobre la velocidad de la luz a través de agua en movimiento y la confirmación del coeficiente de Fresnel

Debido a lo anterior, Fizeau abordó el problema del éter con una innovación experimental significativa. Fizeau identificaba tres hipótesis posibles respecto a la interacción del éter con la materia. La primera era que el éter era completamente independiente de la materia y que ningún movimiento de ésta se podía transmitir al éter; la segunda era que el éter interactuaba con la materia de manera que cuando esta se movía transmitía dicho movimiento al éter como había sugerido Stokes. La tercera hipótesis era que la materia sólo transmite una fracción de su movimiento al éter como había sugerido Fresnel. Para decidir entre estas hipótesis era necesario observar si el movimiento de un medio afecta a la velocidad de la luz. Si, por ejemplo, la materia transmitía su movimiento al éter, éste, a su vez, lo transmitiría a la luz. Sin embargo, debido a la alta velocidad de la luz, sería muy difícil detectar si el movimiento de un medio afectaba a la rapidez de la luz. En otras palabras, el problema al que se enfrentaba Fizeau era encontrar un método de detectar una pequeña variación en el tiempo de propagación de la luz. En 1851, Fizeau encontró una manera de hacer esto, la clave estaba en la propia concepción ondulatoria de la luz, él utilizó el efecto de interferencia estudiado por Arago. El método consistió en producir franjas de interferencia a partir de rayos de luz que habían pasado a través de dos tubos paralelos que contenían fluidos en movimiento, cada uno en direcciones opuestas (Figura 1.7). Aunque la variación fuera relativamente pequeña sería suficiente para causar un desplazamiento perceptible en la interfaz de franjas. Fizeau concluyó que, utilizando agua en movimiento, la velocidad de la luz era alterada por una cantidad que acordaba razonablemente con la hipótesis de Fresnel. (Fizeau, 1851:349-355).

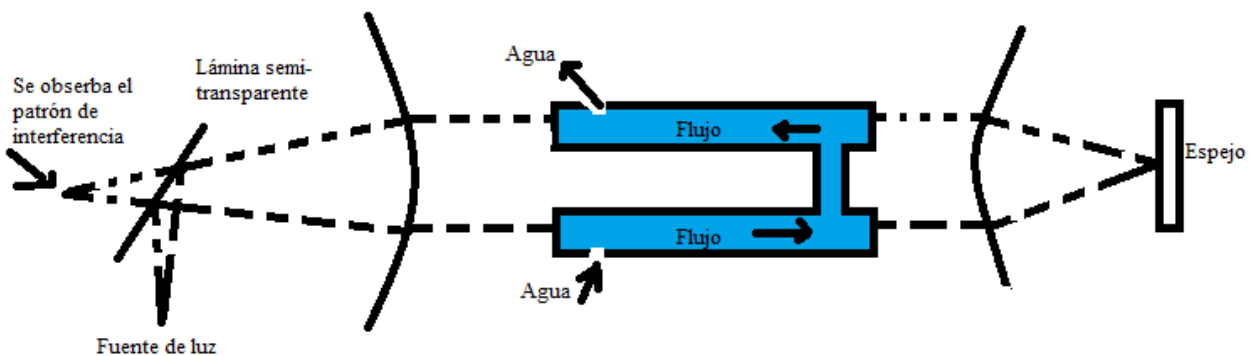


Figura 1.7- Dispositivo experimental de Fizeau a través de agua en movimiento. Las líneas punteadas indican el camino seguido por los rayos de luz. El rayo sale de la fuente y se divide en dos, cada uno llega a la lámina en un punto distinto, el de arriba pasa a través del tubo, contra el flujo de agua, llega al espejo y regresa pasando nuevamente contra el flujo de agua. El de abajo hace el mismo recorrido, pero a favor del flujo. Finalmente, ambos se unen al final donde interfieren entre sí.

Fizeau expone sus resultados en términos de la proporción en que se desplazaban las franjas, de manera que consideraba la longitud de una franja como unidad y luego reporta la proporción que se había desplazado. Él encontró que las franjas se desplazaban una distancia igual a una proporción de 0.46 veces la longitud de cada banda. Si el éter fuera completamente estacionario, es decir, si su movimiento fuera independiente del movimiento del medio entonces no debería haber desplazamiento. Si el éter se moviera con la materia como sugería Stokes, las franjas se deberían desplazar por una proporción de 0.92 veces la longitud de cada banda. Finalmente, si el éter fuera como lo sugería Fresnel y sólo una fracción del movimiento se transmite (la que podía calcularse con su coeficiente de arrastre), la proporción del desplazamiento debía ser 0.4 veces. Fizeau considera que la diferencia entre su resultado y el de la hipótesis de Fresnel se podía deber a pequeños cambios en el movimiento del agua. En otras palabras, la velocidad de la luz sí era modificada por el movimiento del agua, pero la velocidad modificada no era $c+w$ (con c la velocidad de la luz y w la del agua), sino $c + w(1-1/n^2)$ donde n es el índice de refracción del agua. Este factor $1-1/n^2$ es el conocido coeficiente de arrastre de Fresnel. Además, al introducir aire en movimiento en vez de agua, las franjas no se desplazaban, lo cual nuevamente estaba en conflicto con la hipótesis de Stokes que predecía un valor movimiento en las franjas por una proporción de 0.82, mientras que la de Fresnel predecía sólo un desplazamiento de una proporción igual a 0.00045 (debido a que el coeficiente de arrastre depende del índice de refracción del medio en cuestión). Fizeau reconoce que no puede detectar un valor tan pequeño, pero que el de Fresnel es el único compatible con los resultados: “Así la aparente inmovilidad de la franja en el experimento con el aire en movimiento concuerda con la teoría de Fresnel” (Fizeau, 1851:354). Por lo tanto, este experimento parecía apoyar la idea de Fresnel acerca de que el éter sufría sólo un arrastre parcial (Cfr. Everitt, 1980: 214). Fizeau concluye que: “El éxito de este experimento parece implicar la adopción de la hipótesis de Fresnel”, pero señala: “es posible que la concepción de Fresnel parezca tan extraordinaria, y en algunos aspectos, tan difícil de admitir que necesitaremos otras pruebas e incluso un examen a fondo por parte de los geómetras, antes de aceptarla como la realidad de las cosas” (Fizeau, 1851:355). Posiblemente, Fizeau se refiera a la dificultad que implicaba justificar teóricamente el coeficiente de arrastre. Parecía más natural pensar que o bien la materia transmite su movimiento al éter, o bien, no lo hace, pero pensar que se transmite sólo un pequeño porcentaje parecía más bien extraño y requería imaginar un mecanismo que explicara esto. La idea original de Fresnel para justificar su coeficiente de arrastre era cuestionada y finalmente terminó por ser rechazada.

A pesar de los datos aportados por los experimentos de Fizeau, muchos científicos, en especial británicos, aun consideraron que debía haber alguna manera de explicar los efectos observados con el éter de Stokes. Como veremos, la continua búsqueda por más datos acerca de los efectos del éter, lejos de resolver la cuestión la complicarían. Por el momento podemos resumir el capítulo con la figura 1.8, en ella se muestra las dos concepciones de éter que se había intentado establecer, la de Fresnel y la de Stokes, y el apoyo que cada una tenía en los datos experimentales obtenidos.

	A favor	En contra
Fresnel	Explicaba la aberración estelar	La hipótesis de arrastre parcial parecía difícil de justificar.
	Explicaba la ausencia de efectos del éter en los experimentos realizados hasta entonces.	
	El coeficiente de arrastre había sido confirmado por el experimento de Fizeau sobre la luz a través de agua en movimiento.	
Stokes	Explicaba la aberración estelar	La hipótesis del éter de Stokes sólo podía dar cuenta del resultado de Fizeau haciéndose mucho más complicada que la de Fresnel.
	Explicaba la ausencia de efectos del éter en los experimentos realizados hasta entonces.	

Tabla 1.8- El debate entre el éter de Stokes y el de Fresnel. Como se ve la situación hacía difícil llegar a una conclusión. La hipótesis de Fresnel, a diferencia de la de Stokes, estaba apoyada por el experimento de Fizeau, lo que representaba un obstáculo para quienes quisieran adoptar de de Stokes. Sin embargo, las justificaciones teóricas que daba Fresnel para explicar el coeficiente de arrastre eran dudosas y eventualmente fueron descartadas, por lo que parecía más natural buscar una solución basada en la hipótesis de Stokes.

Capítulo 2

La luz como onda electromagnética, la contradicción en los datos sobre el éter y los nuevos sistemas de geometría

En Pasadena, Einstein había preguntado a Michelson por qué había invertido tantos esfuerzos en hacer mediciones de alta precisión de la velocidad de la luz. Michelson había respondido, 'Weil es mir Spass macht,' Porque pienso que es divertido. (A. Pais, *Subtle is the Lord...* 'The Science and the Life of Albert Einstein' 2005:116).

1.-Introducción

Durante el siglo XIX, en Europa, se produjeron algunas de las innovaciones más importantes en la historia de la ciencia. Cada una de dichas innovaciones participó en mayor o menor grado en el desarrollo de la práctica de medición de la velocidad de la luz. Por ejemplo, los crecientes estudios sobre los fenómenos electromagnéticos permitieron comparar las mediciones de la velocidad de la luz, que se habían producido hasta entonces, con los cálculos para la velocidad de las, en ese entonces hipotéticas, ondas electromagnéticas. Ya avanzado el siglo XIX, A. Michelson diseñó su interferómetro que fue uno de los logros técnicos más impresionantes de la época, el cual permitió estudiar la velocidad de la luz con una precisión sin precedentes. Tanto la investigación acerca de las ondas electromagnéticas como la invención del interferómetro de Michelson tuvieron un papel central en las indagaciones sobre la velocidad de la luz y se esperaba que permitieran superar las dificultades que se habían presentado en la búsqueda de principios físicos adecuados. Por otro lado, uno de los eventos más relevantes en la historia del pensamiento, el descubrimiento de las geometrías no euclidianas, no participó, en esta época, en las indagaciones que se habían producido en torno a la velocidad de la luz.

Dada la importancia de las diversas innovaciones que se presentaron en la época, en este capítulo analizo tres de los desarrollos que considero más relevantes en la ciencia del siglo XIX y su relación con los intentos de superar las dificultades identificadas en el capítulo anterior. El objetivo, entonces, es triple, por un lado, analizar el surgimiento de un nuevo principio físico; que la luz era una onda electromagnética, y el debilitamiento de otro; que había un éter mecánico que transmitía a la luz. Por otro lado, examino la implementación del instrumento conocido como interferómetro, cómo esto representó un nuevo nivel de desarrollo en la búsqueda de datos y las consecuencias que en aquel momento se extrajeron de este logro. Finalmente, analizaré un desarrollo independiente que se dio en las matemáticas, el descubrimiento de las geometrías no euclidianas y algunos de los debates que se produjeron en torno a su aplicación en física. En otras palabras, en este capítulo presento tres desarrollos epistemológica, metodológica y cognitivamente diferentes y el grado de independencia que tuvieron, unos de otros, y en qué medida permitieron o no esclarecer la búsqueda de principios físicos adecuados en la medición de la velocidad de la luz.

Lo importante será notar hasta qué punto los principios físicos que se habían considerado resultaron inadecuados y cómo, a pesar de que la búsqueda por dichos principios físicos deberá continuar, el desarrollo del electromagnetismo y las técnicas experimentales de Michelson sí impondrán requerimientos concretos para determinar qué soluciones eran aceptables. Por otro lado, la importancia de los desarrollos en geometría radica en el hecho de que abrieron nuevas posibilidades, es decir, permitieron que existieran nuevos *modelos matemáticos*¹² para ser utilizados en posibles soluciones futuras a las dificultades encontradas.

2.1-Primeras mediciones sobre los fenómenos electromagnéticos

Autores como Tom Standage (1998) y Bruce J. Hunt (2002) relacionan la investigación en electricidad y magnetismo, de finales del siglo XVIII y durante el siglo XIX, con la búsqueda y desarrollo de nuevos métodos de comunicaciones a distancia. Ya hemos visto, en el capítulo anterior (sección 2), la dificultad que existía para coordinar relojes en posiciones distantes, lo que era necesario para la localización de posiciones geográficas y, por consiguiente, para el perfeccionamiento de mapas, entre otras actividades. Ésta es una de las dificultades que podían resolverse con métodos prácticos que permitieran la comunicación a distancia. Los estudios en electricidad y magnetismo, finalmente, hicieron esto posible con el descubrimiento y perfeccionamiento de telégrafos eléctricos funcionales. Estas innovaciones partieron de dos descubrimientos particularmente importantes; las baterías de Alessandro Volta (1745-1827) en 1800 y el descubrimiento del electromagnetismo por el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) en 1820. Este último observó que una corriente eléctrica que fluía en un cable daba lugar a un campo magnético, dicho campo magnético podía detectarse por sus efectos en la aguja de una brújula. Poco después, Micheal Faraday (1791-1867) produjo el efecto inverso al descubrir que moviendo un imán cerca de una espira de alambre generaba una corriente, a esto se le conoció como inducción electromagnética. A partir de entonces, la invención del galvanómetro (un dispositivo que indicaba el flujo de corriente eléctrica mediante el movimiento de una aguja rotante) y el electroimán (una bobina que se comportaba como imán cuando fluía corriente en ella) hicieron posible la construcción de telégrafos eléctricos funcionales. Uno de los primeros en aplicar esta tecnología fue Wilhelm Weber (1804-1891) junto con Carl Friedrich Gauss (1777-1855) quienes instalaron una línea de telégrafos de casi tres kilómetros en 1833.

Gauss había trabajado en la determinación de posiciones geográficas, en particular, en determinar las dimensiones del territorio de Hannover, de hecho, él realizó personalmente gran parte del trabajo de campo entre 1818 y 1825, además, diseñó instrumentos de medición para este propósito. Sin embargo, “Una variedad de dificultades prácticas hicieron imposible lograr la exactitud que él había esperado... Sus resultados fueron usados para hacer toscos mapas geográficos y militares, pero no eran adecuados para mediciones topográficas precisas” (May

¹² Por modelos matemáticos me referiré a descripciones matemáticas, abstractas e interpretativas de un fenómeno que permiten calcular y concebir el comportamiento de los parámetros asociados a dichos fenómenos (Cfr. Guillaumin 2016:69-73). El concepto de *modelos*, como el de *datos* y el de *principios físicos*, es una categoría de análisis que tomo de Guillaumin (2016).

1980:303). Debido a esto, Gauss reconoció rápidamente la ventaja del uso de telégrafos eléctricos. Estos estudios en mediciones de distancias geográficas tuvieron como consecuencia, por una parte, que se reconociera la necesidad de mejorar la tecnología de los telégrafos eléctricos y, por otro, llevaron a Gauss al concepto matemático de métrica en el estudio de superficies curvas que sería desarrollado por G. F. B. Riemann (1826-1866) y que tendrá una importancia clave en los desarrollos que expongo en la sección 4.

En cuanto a las nuevas tecnologías de telégrafos eléctricos, éstas requerían perfeccionamiento para lo cual se necesitaba una mejor comprensión de los fenómenos electromagnéticos. Dicha necesidad generó que se desarrollaran métodos para medir parámetros asociados a los fenómenos eléctricos y magnéticos. Por un lado, ya había métodos que los estudios previos habían producido para medir efectos electrostáticos (utilizando la fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos cargados), por otro lado, la invención del galvanómetro y el electroimán permitió desarrollar otras técnicas (por ejemplo observar los efectos que una corriente tenía en una aguja imantada), pero no era claro cómo relacionar unos procedimientos con otros. Por ejemplo, no era clara la relación entre las unidades de electricidad medidas en fenómenos electrostáticos y las unidades de electricidad cuando se medían fenómenos electromagnéticos. Es por ello que Weber llevó a cabo una investigación, en colaboración con R. Kohlrausch (1809-1858), con la que se proponía establecer una relación entre diferentes unidades de medición utilizadas en las investigaciones de la época sobre electricidad y magnetismo. Esta investigación fue importante porque permitió encontrar una constante que posteriormente se relacionaría a la velocidad de la luz. Weber y Kohlrausch (1856) señalaban que la unidad de corriente eléctrica no podía determinarse directamente con mediciones electrostáticas debido a que determinar la unidad de intensidad de corriente eléctrica mediante la fuerza con la que dos fluidos eléctricos actúan entre sí, a través de una distancia dada, requiere conocer la cantidad de fluido eléctrico contenido en una unidad cubica de un conductor o la velocidad con la que se desplazan, pero no había manera de determinar ninguna de estas dos. En otras palabras, relacionar la unidad de intensidad de corriente a unidades mecánicas, lo que llaman medición mecánica (o electrostática), requiere conocer parámetros a los que no tenemos acceso. Debido a esto, Weber y Kohlrausch (1856) sugirieron buscando otros efectos para determinar la unidad de corriente eléctrica. Uno de los efectos que encontraron fue la electrólisis, es decir, la corriente eléctrica podría determinarse a partir de la unidad de masa de agua que se puede descomponer en una unidad de tiempo. Otra forma de proceder consistiría en utilizar el momento rotacional de una aguja magnética que posee una unidad de magnetismo cuando una corriente que pasa por un conductor circular, que circunscribe una unidad de área, actúa sobre ella a una distancia arbitraria. A esta última la llamaron medición magnética. Una tercera forma sería utilizar el efecto que dos corrientes cercanas ejercen entre sí, a esta lo llamaban medición electrodinámica. Weber y Kohlrausch (1856) realizaron un experimento con el fin de encontrar la relación entre estos procedimientos de medición. Los resultados les permitieron concluir que la proporción entre una medición electrodinámica y una mecánica (electrostática) era una constante con unidades de velocidad que se aproximaba al valor de la velocidad de la luz. (Cfr. Everitt, 1980:204-205 y Darrigol, 2000:66). Posteriormente,

William Thomson (1824-1907) y J. C. Maxwell hicieron, sus propias mediciones de dicha constante de manera independiente. En lo sucesivo me referiré a ésta como constante de Weber.

2.2.- Maxwell y la luz como onda electromagnética

Estas investigaciones permitieron a J. C. Maxwell relacionar la propagación de ondas eléctricas y magnéticas con la velocidad de la luz. Dicha idea puede encontrarse en uno de sus trabajos más importantes: *A Treatise on Electricity and Magnetism* publicado por primera vez en 1873. El *Treatise* se ha visto como una exposición de los trabajos de Maxwell y consiste en una detallada revisión y análisis de los fenómenos eléctricos y magnéticos en él que se expone un grupo de ocho ecuaciones que describían el campo electromagnético. Estas ecuaciones encarnaban la idea de que los procesos electromagnéticos son transmitidos a través del espacio circundante a una carga o cuerpo magnetizado. Esto estaba en continuidad con el trabajo de Faraday y en contraposición con la idea de que la electricidad y el magnetismo actuaban a distancia defendida por Ampere (Cfr. Everitt, 1980:211-212).

En el capítulo XX de su *Treatise*, Maxwell considera la propagación de una perturbación electromagnética a través de un medio no conductor al que supone en reposo. A partir de las ecuaciones que ha desarrollado a lo largo del texto, él deduce las ecuaciones de la figura 2.1.

$$\begin{aligned}K\mu \frac{d^2 F}{dt^2} + \nabla^2 F &= 0, \\K\mu \frac{d^2 G}{dt^2} + \nabla^2 G &= 0, \\K\mu \frac{d^2 H}{dt^2} + \nabla^2 H &= 0.\end{aligned}$$

Figura 2.1.- Ecuaciones de Maxwell para una perturbación electromagnética en un medio estacionario, no conductor. (Tomada de Maxwell, 1873:396)

Donde F, G y H son componentes de vectores que caracterizan al campo electromagnético, K representaría la capacidad específica de inducción electrostática y μ la permeabilidad magnética. Estas ecuaciones relacionan una perturbación a través del tiempo (primer término) con una a través del espacio (segundo término). Esto es lo que ocurre en las ecuaciones que describen movimientos ondulatorios. En otras palabras, las ecuaciones obtenidas en la figura 2.1 representan una perturbación electromagnética ondulatoria que se propaga con una velocidad $1/(\sqrt{\mu_0\epsilon_0})$. Es decir, representan ondas que se transmiten con una velocidad definida por constantes conocidas utilizadas en electromagnetismo. Finalmente, Maxwell (1881:397) argumenta que este valor coincide con el de la constante que Weber había obtenido al comparar la proporción entre unidades medidas con métodos electrodinámicos y métodos electrostáticos.

Lo que Maxwell había encontrado era que, a partir de sus ecuaciones para caracterizar el campo electromagnético, se podía deducir ecuaciones para perturbaciones ondulatorias

(ecuaciones de onda) que se debían propagar con la velocidad de la luz. Esto le permitió inferir que era posible la existencia de ondas electromagnéticas y que dichas ondas debían propagarse en un medio no conductor con una velocidad que podía obtenerse a partir de las mediciones de la constante de Weber. El acuerdo entre esta medición y las mediciones de la velocidad de la luz que se habían producido (Figura 2.2) permitieron a Maxwell inferir un nuevo principio físico; que la luz era, de hecho, una onda electromagnética.

Velocity of Light (mètres per second).		Ratio of Electric Units.	
Fizeau	314000000	Weber.....	310740000
Aberration, &c., and Sun's Parallax }...	308000000	*Maxwell...	288000000
Foucault	298360000	*Thomson...	282000000

Figura 2.2- Comparación de las mediciones de la velocidad de la luz y la medición de la proporción entre unidades electrostáticas y magnéticas que coincide con la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas tal y como aparece en el *Treatise de Maxwell*. (Tomada de *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1881, Vol. II, p. 397).

Así Maxwell fue capaz de integrar los fenómenos electromagnéticos con la óptica. Una consecuencia de dicha integración fue que el medio en el que se propagaban los efectos de la electricidad y el magnetismo debía ser el mismo que propagaba la luz; el éter. Sin embargo, Maxwell no logró dar cuenta apropiadamente de dicho medio y aun habría poco consenso en la identificación de la luz con ondas electromagnéticas hasta los trabajos de Hertz.

Maxwell, dejó su teoría electromagnética en un estado lleno de imperfecciones y oscuridades. La superioridad de su aproximación no fue autoevidente para sus contemporáneos. La mayor autoridad británica en electricidad, Sir William Thomson, despreció la teoría de Maxwell por alejarse de los hechos empíricos sin ofrecer una representación mecánica de los procesos básicos del campo... A través de su indispensable tratado, Maxwell logró, sin embargo, transmitir sus ideas y las de Faraday a algunos físicos británicos. (Darrigol, 2000:205-206).

2.3.- La confirmación de la existencia de ondas electromagnéticas por H. Hertz

La labor de clarificación de los planteamientos de Maxwell, así como la búsqueda de datos experimentales que pusieran a prueba sus ideas, sería llevada a cabo por investigadores como el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) quién, posteriormente, mostró la existencia de las ondas electromagnéticas anticipadas por Maxwell. Aunque la posibilidad de producir las ondas mencionadas es una consecuencia de las ideas de Maxwell, no era obvio y no se había reconocido explícitamente. Maxwell sólo había hecho énfasis en su identificación con la luz, pero no en la posibilidad de producirlas y detectarlas por medios electromagnéticos. Para 1886, Hertz había concluido que el centro de interés en la teoría de Maxwell era su afirmación sobre la propagación finita de ondas eléctricas en el aire por lo que, si se mostraba que éstas existían,

podía concluirse que la concepción de la electricidad y el magnetismo que proporcionaba Maxwell era acertada. Finalmente, Hertz fue capaz de producirlas con un circuito abierto conectado a una bobina, mismas que podía detectar con una simple espira de alambre en un circuito abierto. Al mover dicho detector a diferentes distancias, logró medir la longitud de onda de las ondas eléctricas que estaba produciendo. Con este valor, y la frecuencia calculada del oscilador (el circuito con bobina), también fue capaz de obtener la velocidad de las ondas que producía. Así, Hertz vio aquí la primera demostración de propagación finita de los efectos asociados a la electricidad y el magnetismo, algo que muchos habían considerado acción a distancia. Hertz, adicionalmente, continuó realizando más experimentos con los que mostró la analogía entre las ondas eléctricas y la luz. Por ejemplo, hizo pasar las ondas eléctricas por un prisma demostrando que se refractaban exactamente como ondas de luz, también polarizó ondas eléctricas dirigiéndolas a través de un par de cables paralelos y las difractó interrumpiéndolas con una pantalla con un agujero en ella. Además, reflejó las ondas eléctricas de una pared del cuarto obteniendo interferencia entre las ondas originales y las ondas reflejadas. También las enfocó con grandes espejos cóncavos produciendo sombras eléctricas con obstáculos conductores. “El experimento con espejos especialmente atrajo la atención, debido a que era la refutación más directa de la acción a distancia en electrodinámica” (McCormach, 1980a:346). Estos experimentos con espejos, y los que mostraban una velocidad de propagación finita de las ondas, generaron una rápida conversión, en la física europea, de quienes defendían la suposición de acción a distancia en electrodinámica a la teoría de Maxwell de procesos electrodinámicos tomando lugar en un medio. Pronto se hizo claro que un éter electromagnético podía asumir las funciones del éter lumínico. Además, la producción y detección de ondas electromagnéticas hicieron posible el desarrollo de nuevas tecnologías, como las desarrolladas por Guglielmo Marconi quien utilizó las ondas descubiertas por Hertz para enviar y recibir señales eléctricas sin cables. Entre otras cosas, esto permitió sincronizar relojes a distancia sin la necesidad de largos y costosos cables, obteniendo una precisión sin precedentes en los métodos para determinar longitudes geográficas. Galison (2005) considera que estos logros probablemente están relacionados a las definiciones que posteriormente utilizarían A. Einstein y H. Poincaré de la simultaneidad como sincronización de relojes mediante señales lumínicas.

Sin embargo, aunque estos logros tecnológicos fueron espectaculares, era claro que aun había muchos aspectos de la luz y, por consiguiente, de las ondas electromagnéticas que no estaban claros, sobre todo en lo que se refiere al medio que hacía posible su propagación. Hertz (1893:241-243) especuló que el éter sufría un arrastre mecánico por cuerpos en movimiento, de la manera que sugería Stokes, aunque al mismo tiempo reconoció que la suposición de un éter que pudiera ser arrastrado era un fundamento poco seguro para la electrodinámica y consideró que intentar dar una interpretación más plausible del éter sería prematuro y requeriría generar más hipótesis arbitrarias. En su *Heidelberg lecture*, sobre su trabajo en ondas eléctricas, afirmó: “Directamente conectado con esto está el gran problema de la naturaleza y propiedades del éter que llena el espacio, de su estructura, de su reposo o movimiento, de su extensión finita o infinita. Más y más sentimos que éste es un asunto de total importancia, y que la solución a esto no solo

revelara la naturaleza de lo que se suele llamar imponderables, sino también la naturaleza de la materia misma y de sus propiedades más esenciales –el peso y la inercia” (Hertz, 1889:326).

Por otro lado, a pesar de que estos trabajos convencieron a los científicos de aceptar las ideas de Maxwell, quedaba el problema de establecer qué interpretación debía darse a los planteamientos de éste, ya que no todos entendían sus ideas de la misma manera y las interpretaciones se habían diversificado. Hertz trató de mejorar la forma matemática de la teoría que, en su opinión, era perfecta en contenido físico, pero no en su formulación matemática. El problema era construir expresiones matemáticas consistentes que expresara el contenido fielmente, pero que, además, eliminara todo indicio de fuerzas a distancia y la asociación con fluidos eléctricos. Entre las correcciones que Hertz buscaba introducir podemos encontrar un intento de interpretar las ideas de Maxwell de tal manera que fuera posible incorporar una simetría formal en la electrodinámica, dicha simetría era entendida por Hertz como la posibilidad de, dado un fenómeno electromagnético, producir uno similar intercambiando la electricidad por el magnetismo y viceversa. Es decir, era sugerente que fuera posible inducir corriente eléctrica mediante un imán y generar un campo magnético mediante corriente. Parece que Hertz consideraba que había, en la naturaleza, una simetría en el sentido de que la electricidad generaba magnetismo y el magnetismo generaba electricidad. Sin embargo, las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell no rescataban completamente dicha simetría y Hertz parece haber considerado que esto motivaba la necesidad de revisarlas. En su artículo *On the Dimension of the Magnetic Pole in Different Systems of Units*, dice explícitamente que busca hacer intercambiables a los efectos magnéticos y electrostáticos en la generación de fenómenos relacionados con éstos: “podemos hacer que los sistemas magnéticos y electrostáticos cambien lugar” (Hertz, 1885:292). Lo anterior se muestra en su descripción de la manera en que podemos obtener la explicación de la inducción de un circuito magnético a partir de la explicación que se daba de la inducción eléctrica con sólo intercambiar las palabras eléctrica por magnética donde aparezcan (Cfr. Hon & Goldstein, 2005:492-503). En pocas palabras, Hertz consideraba que los conceptos de fuerza eléctrica y fuerza magnética se habían estado deduciendo de manera asimétrica, o no intercambiables, en la física de la época, y él se proponía resolver eso mediante una revisión de las ecuaciones de Maxwell. En la misma época, Oliver Heaviside (1850-1925) realizó análisis en una dirección similar, él describió a las ecuaciones de Maxwell no propiamente como asimétricas, sino como incompletas, consideraba que les faltaba mostrar de manera más adecuada la correspondencia entre fenómenos eléctricos y magnéticos. Heaviside estableció una forma simétrica de las ecuaciones de Maxwell con el fin de facilitar sus aplicaciones (Cfr. Hon & Goldstein, 2005:492-503). Como se verá, esto será relevante también para Einstein en su artículo de 1905. De manera que profundizaré en esta insatisfacción, que los científicos de la época parecen haber expresado, con la electrodinámica en el capítulo 4.

3.-Los experimentos de Michelson

Los debates acerca del papel del éter cobraron más y más relevancia, pero ni Hertz ni Maxwell lograron dar con una hipótesis sobre éste que fuera congruente con los fenómenos ópticos conocidos. Los resultados exitosos en relación a la naturaleza de la luz, como su carácter ondulatorio y su conexión con la electricidad y el magnetismo, son independientes de si se adopta un éter como el de Stokes o como el de Fresnel. Este vacío dificultaba caracterizar la relación que claramente había entre luz, materia, electricidad y magnetismo. Maxwell había sido consciente de este inconveniente y había tratado de diseñar experimentos que permitieran aclarar el conocimiento de la época sobre la naturaleza del éter. Por ejemplo, llegó a sugerir que observando eclipses de los satélites de Júpiter, cuando éste se movía en diferentes direcciones con respecto a la Tierra, sería posible identificar si la Tierra se mueve respecto al éter, como debía hacerlo según Fresnel. Sin embargo, Maxwell concluyó, después, que no había métodos suficientemente precisos como para que permitieran detectar los cambios que debían existir en los tiempos de las observaciones. Respecto de llevar a cabo un experimento en Tierra, Maxwell consideraba que sería necesario recurrir a un método de interferencia como el de Fizeau, pero como para ello tendríamos que dividir el mismo rayo de luz y luego hacer coincidir ambas partes, la velocidad que uno de los rayos ganaría al viajar en la dirección del éter la perdería casi por completo al regresar y lo mismo sucedería con el segunda rayo. Es decir, para observar si el éter afecta el movimiento de los rayos de luz es necesario dividirlo y enviar una parte en una dirección (la misma en la que supuestamente se mueve la Tierra respecto al éter) y la otra en la dirección opuesta, pero luego debemos hacerlos interferir para comparar sus velocidades y eso sólo es posible si se les hace regresar al mismo punto, ello haría que se perdiera casi toda la diferencia en sus velocidades.

Sin embargo, Albert A. Michelson (1852-1931), quien se refiere a este reto de Maxwell en la publicación de sus resultados experimentales en 1881, ideó una manera de hacer una medición mediante interferencia que evitara el problema. Michelson había ganado reputación por su medición de la velocidad de la luz (1878) a partir del método de Foucault, pero con una notable mejora en la precisión. Hay que decir que los experimentos que Michelson llevaría a cabo para estudiar los efectos del éter representan uno de los logros técnicos más notables del siglo XIX. Aunque parezca exagerado, Michelson sería capaz de medir una variación en la velocidad de la luz que tenía una proporción de uno en cien millones. Esto sería posible gracias a su diseño de un interferómetro. Holton, por ejemplo, se refiere al aparato de Michelson así: “El interferómetro era una cosa encantadora. Inventado por el Michelson de veintiocho años... Es hasta este día uno de los más precisos en ciencia, y el experimento llevó la precisión hasta sus límites” (Holton, 1969:136). Michelson realizó el primer experimento de la manera siguiente:

Sabemos que una velocidad se puede obtener como la distancia recorrida en un tiempo, por lo que el tiempo se puede obtener a partir de la proporción entre la distancia y la velocidad. Es decir, el tiempo es igual a la distancia sobre la velocidad. Ahora, si la velocidad de la Tierra es v y la velocidad de la luz es c , entonces el tiempo que le tomaría a la luz viajar una distancia l en la misma dirección que la Tierra, que llamaremos t_1 , sería:

$$t_1 = \frac{l}{c + v} \quad (2.1)$$

Como se puede ver, el tiempo se obtiene con la distancia l entre la velocidad aumentada $c+v$. Pero al viajar en dirección contraria, el tiempo, que llamaremos t_2 para diferenciarlo del anterior, sería:

$$t_2 = \frac{l}{c - v} \quad (2.2)$$

Por lo tanto, un rayo de luz que viajara primero en la dirección de movimiento del éter una distancia l y luego se reflejara de manera que recorriera el mismo camino de regreso le tomaría un tiempo total dado por la suma de los anteriores, de 2.1 y 2.2:

$$t = \frac{l}{c + v} + \frac{l}{c - v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} \approx \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (2.3)$$

La diferencia entre este tiempo y el tiempo que haría la luz en ir y regresar la misma distancia, pero en una dirección tal que no se afectara por el movimiento de la Tierra sería:

$$\Delta t \approx \frac{2l v^2}{c c^2} \quad (2.4)^{13}$$

El problema para medir esta diferencia es que, dado que la velocidad de la Tierra v es muy pequeña en relación con la velocidad de la luz c , la proporción v/c resulta en un valor muy pequeño y como para este caso la proporción es, de hecho, v^2/c^2 la variación relativa del tiempo es de una parte en cien millones. El problema al que se enfrentaba Michelson era encontrar una manera de detectar una variación tan pequeña en el tiempo de propagación de la luz.

Lo que necesitó Michelson en 1881 fue hacer uso de una técnica similar a la de Fizeau. Era necesario dividir un rayo de luz en dos y hacer que cada uno recorriera caminos diferentes, posteriormente sólo necesitaba hacerlos interferir produciendo un patrón de interferencia. Pero, en este caso, Michelson compararía rayos que seguían trayectorias perpendiculares. Las franjas producidas deberían presentar un desplazamiento si una de las trayectorias es paralela a la dirección del movimiento del éter y luego se gira el dispositivo para que quede perpendicular al anterior.

¹³ El símbolo \approx indica aproximación.

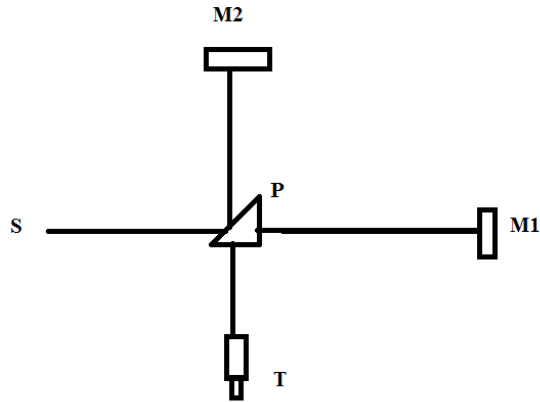


Figura 2.3- Diagrama del experimento de Michelson. Aquí, S representa la fuente de luz, P representa una lámina de cristal que posee una capa de metal semitransparente en su superficie, $M1$ y $M2$ son espejos y T un telescopio.

En el experimento (Figura 2.3) una fuente S produce un rayo de luz que se dirige hacia una superficie semitransparente que divide el rayo de luz en dos partes, una parte atraviesa la lámina y llega al espejo $M1$ donde se refleja y regresa por el mismo camino de regreso a la lámina y una fracción del mismo es reflejado hacia un telescopio T . La otra parte del rayo que salió de S y se separó en la lámina se dirige hacia el espejo $M2$ y regresa, una fracción del mismo también pasa hacia el telescopio T . Lo que se observa en T son franjas de interferencia (similares a las que produce un prisma). Ahora, si designamos como l_1 a la distancia que va de P a $M1$ y como l_2 a la que va de P a $M2$, tenemos:

$$2(l_1 - l_2) = m\lambda \quad (2.5)$$

Donde m es un número entero y λ la longitud de onda del rayo de luz. Esta última ecuación indica cuánto se moverían las franjas si cambiáramos las distancias l_1 y l_2 . Una de los supuestos de los que partió Michelson fue que el rayo de luz que va en dirección de $PM2$ y de regreso no es afectado por el movimiento de la Tierra a través del éter pues sigue una trayectoria perpendicular a éste. La idea era utilizar la diferencia en tiempos que le toma a la luz recorrer cada uno de los caminos ópticos $PM1$ y $PM2$, es decir, los brazos del interferómetro. Por su parte, el rayo de luz que sigue la trayectoria $PM1$ tendrá una velocidad $c-v$ cuando va hacia $M1$ y una velocidad $c+v$ en el recorrido de regreso. De manera que el tiempo que tardara la luz en ir de P a $M1$ y de regreso (t_1) y el tiempo que tarda en ir de P a $M2$ y de regreso (t_2) estarán dados por:

$$t_1 = \frac{l_1}{c+v} + \frac{l_1}{c-v} = \frac{2l_1c}{c^2 - v^2} \quad (2.6)$$

$$t_2 = \frac{2l_2}{c} \quad (2.7)$$

La diferencia entre estos tiempos, para v mucho más pequeña que c , viene dada aproximadamente por:

$$\Delta = t_1 - t_2 \approx \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{2l_2}{c} = \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{2l_1 v^2}{c^3} \quad (2.8)$$

Si a continuación hacemos girar todo el aparato de manera que ahora PM2 sea paralelo al movimiento del éter obtenemos una nueva diferencia de tiempos

$$\Delta' = \frac{2(l_1 - l_2)}{c} - \frac{2l_2 v^2}{c^3} \quad (2.9)$$

Aquí Δ y Δ' representan las diferencias de tiempos en los dos casos, antes y después de rotar el interferómetro, es decir cuando el movimiento de uno de los brazos es paralelo al movimiento del éter mientras que el otro es perpendicular la diferencia es Δ y cuando el que inicialmente era paralelo queda perpendicular al movimiento del éter la diferencia de tiempos es Δ' . Esto generará un corrimiento determinado de franjas, dicha movimiento δ estará dado por:

$$\delta = \frac{c(\Delta - \Delta')}{\lambda} \quad (2.10)$$

Sustituyendo nos queda:

$$\delta = \frac{2v^2(l_1 + l_2)}{\lambda c^2} \quad (2.11)$$

Si además hacemos a l_1 y l_2 iguales y a la distancia que l_1 y l_2 representan ahora la llamamos l , obtenemos:

$$\delta = \frac{4 \left(\frac{v}{c} \right)^2 l}{\lambda} \quad (2.12)$$

Los investigadores de la época habían concluido que la Tierra giraba alrededor de su órbita a una velocidad de 30km/s. Con este valor, la longitud de los brazos del interferómetro ($l=1.2m$) y el valor de la velocidad de la luz así como de la longitud de onda del rayo utilizado en este caso (amarillo, es decir, con $\lambda \approx 550nm$), Michelson concluyó que si el éter era atravesado por la Tierra como lo proponía la hipótesis de Fresnel, entonces la proporción de desplazamiento para las bandas es $\delta=0.08$, en otras palabras, las franjas debían desplazarse una proporción de 0.08 su distancia mutua. Al final, no ocurrió ningún desplazamiento significativo en las franjas de interferencia. Michelson encontró a lo más la proporción 0.048 lo que considera dentro del error de los instrumentos (Michelson 1881:128). Esto llevaba a la conclusión de que el éter

estacionario de Fresnel debía ser abandonado. La opción más natural era el éter de Stokes. Debido a que Stokes había propuesto que el éter se adhería a la superficie de la Tierra, el resultado nulo del experimento de Michelson era completamente compatible y esperado. Sin embargo, aun era difícil reconciliar la propuesta de Stokes con la confirmación del coeficiente de arrastre de Fresnel por el experimento de Fizeau a través de agua en movimiento. El principio físico del éter de Stokes podía ser modificado para incluir el resultado de Fizeau, pero esto lo haría aun más complicado de lo que ya era. Adicionalmente, Michelson utilizó su interferómetro para repetir cuidadosamente el experimento de Fizeau en 1886 con la ayuda de Edward Morley y sus resultados confirmaban nuevamente el coeficiente de Fresnel. En otras palabras, con los resultados del primer experimento, Michelson concluía: “La interpretación de estos resultados es que no hay desplazamiento de las bandas de interferencia. *El resultado para la hipótesis de un éter estacionario muestra ser incorrecta*, y la conclusión necesaria es que la hipótesis es errónea” (Michelson, 1881:128, énfasis mío). Y en el experimento de 1886 concluía: “El resultado de este trabajo es por lo tanto que el resultado anunciado por Fizeau es esencialmente correcto; y que *el éter lumínico es enteramente inafectado por el movimiento de la materia que permea*” (Michelson and Morley 1886:386, énfasis mío). Es decir, el éter no parece permanecer estacionario, pero tampoco parece que se mueva con la materia¹⁴.

Unos años después Oliver J. Lodge (1851-1940) realizó un experimento para el que construyó una “maquina de giros” que consistía en dos discos de acero que giraban a gran velocidad uno del otro. Dado que el éter de Stokes podía ser arrastrado por la materia, Lodge esperaba que con un interferómetro como el de Michelson fuera posible detectar el efecto del movimiento del éter en un rayo de luz cercano a los dos discos rotantes. Sin embargo, Lodge no detectó ningún efecto del éter (Cfr. Darrigol, 2000: 316-319). El éter de Fresnel parecía seguir siendo el que más se conformaba a los fenómenos estudiados, pero también era inconsistente con el resultado de Michelson. En otras palabras, la situación era más paradójica que nunca.

¹⁴ Michelson sería el primer estadounidense en ganar el premio Nobel de física en 1907, aunque no por su experimento sobre el éter, sino por el uso del interferómetro para establecer estándares de medición de distancia a partir de la longitud de onda de la luz.

	A favor	En contra
Fresnel	Explicaba la aberración estelar	El experimento de Michelson de 1881 no detectó los efectos del movimiento de la Tierra a través del éter que se esperaban para un éter estacionario.
	El coeficiente de arrastre había sido confirmado por el experimento de Fizeau sobre la luz a través de agua en movimiento y por Michelson y Morley en 1886.	
	Explicaba el resultado de Lodge	
Stokes	Explicaba la aberración estelar	La hipótesis del éter de Stokes sólo podía dar cuenta del resultado de Fizeau y de Michelson de 1886 haciéndose mucho más complicada que la de Fresnel.
	Explicaba el resultado de Michelson de 1881	Experimento de Lodge no detectó los efectos que debía producir el éter de Stokes

Figura 2.4.- La tabla presenta un resumen de los debates en torno al éter durante las últimas décadas del siglo XIX. Cada versión del éter tenía resultados experimentales a favor y en contra. Como se puede observar, ambas entraban en conflicto con al menos un resultado experimental.

4.- Los nuevos sistemas de geometría en el siglo XIX

Durante la misma época, la matemática alcanzó uno de los desarrollos más significativos de la historia del pensamiento; el surgimiento de las geometrías no euclidianas. Éstas consistían en sistemas de geometría alternativos al que había sido desarrollado por Euclides, el cual había sido un punto de partida para una gran cantidad de estudios en matemáticas, física y filosofía durante milenios y lo seguía siendo en el siglo XIX. La geometría de Euclides parte de una serie de definiciones y nociones básicas así como de cinco postulados. Se supone que, a partir de dichas definiciones y nociones, uno puede derivar una serie de consecuencias lógicas, o teoremas, que permiten resolver una amplia gama de problemas geométricos sin necesidad de elementos adicionales¹⁵. Este sistema resultó ser notablemente exitoso.

Con todo, el sistema de Euclides sólo funciona en contextos en los que se da por hecho que se cumplen los postulados que, en su mayoría, parecen ser intuitivamente ciertos, excepto por el quinto que parece ser una conclusión más elaborada. Este quinto postulado puede formularse de distintas maneras y en su forma más simple dice que las rectas paralelas no se cruzan, más formalmente, si una línea recta corta a otras dos produciendo ángulos interiores menores a dos ángulos rectos, entonces dichas rectas se cortarían del lado en que formaron esos ángulos menores a dos ángulos rectos, si las rectas se extienden indefinidamente. Durante mucho tiempo diversos investigadores pensaron que debía ser posible probar el mencionado quinto postulado a partir de

¹⁵ Esto no es estrictamente cierto hasta formulaciones muy posteriores a Euclides.

los anteriores. Posteriormente, Gauss comenzó a estudiar superficies curvas de dos dimensiones en las que no se cumple el quinto postulado. Su análisis se basaba en tratar de expresar la distancia entre puntos vecinos en un sistema de coordenadas arbitrario, sin embargo, no publicó sus trabajos sobre este tema¹⁶. Por la misma época, alrededor de 1820, Nikolai I. Lobachevsky (1793-1856) y Janos Bolyai (1802-1860) se dieron cuenta, de manera independiente, de la posibilidad de construir sistemas geométricos alternativos a partir de la negación del quinto postulado de Euclides e intentaron probar la validez de estos sistemas a escala astronómica, pero sin lograr conclusiones convincentes sobre la posibilidad de dicha aplicación.

Este nuevo sistema de geometría permitía derivar teoremas contrarios a los de Euclides, como que los ángulos interiores de un triángulo podían sumar menos de 180° . Hasta finales de la década de 1860 se le prestó poca atención a estos resultados y aún después se les veía como meros ejercicios de deducción lógica sin significado físico o filosófico, aun suponiendo que fueran completamente consistentes lo que no estaba claro en un inicio. Sin embargo, Lobachevsky había afirmado que cualquier contradicción que pudiera encontrarse en su geometría inevitablemente tendría que tener como consecuencia una contradicción en la geometría de Euclides, por lo que no podía argumentarse que hubiera algún problema lógico con ella si no lo había con Euclides. “Más adelante, [Felix] Klein logró probar esto usando un modelo euclidiano de geometría no euclidiana, esto es, interpretando sistemáticamente términos de geometría no euclidiana como términos euclidianos, la geometría no euclidiana es ciertamente tan consistente como la geometría de Euclides” (Jammer, 1993:146).

Los debates acerca de la posibilidad de aplicar la geometría no euclidiana a la física se intensificaron luego de las aportaciones de G. F. B. Riemann (1826-1866) quién se aproximó al tema con un enfoque diferente al de sus predecesores. Riemann generalizó la teoría de superficies de Gauss y utilizó el concepto de curvatura para concluir que tanto la geometría de Euclides como la de Lobachevski y Bolyai eran casos de curvatura particulares. Es decir, Riemann se dio cuenta, como Gauss, de que las propiedades geométricas de un espacio pueden depender de cómo es su curvatura. La curvatura de una esfera es diferente de la que tiene un plano o un paraboloide hiperbólico (figura 2.5). Así Riemann identificó tres maneras en que un espacio se podía curvar y su relación con un tipo específico de geometría; él llamó curvatura negativa a un espacio que presentaría una geometría como la de Lobachevski, mientras que uno con curvatura cero (un espacio plano) presentaría una geometría similar a la de Euclides. Adicionalmente, una curvatura positiva sería el espacio que requeriría una geometría esférica.

¹⁶ Al parecer temía no ser tomado en serio. La publicación de los trabajos de Gauss sobre este tema sólo se llevó a cabo hasta años después.

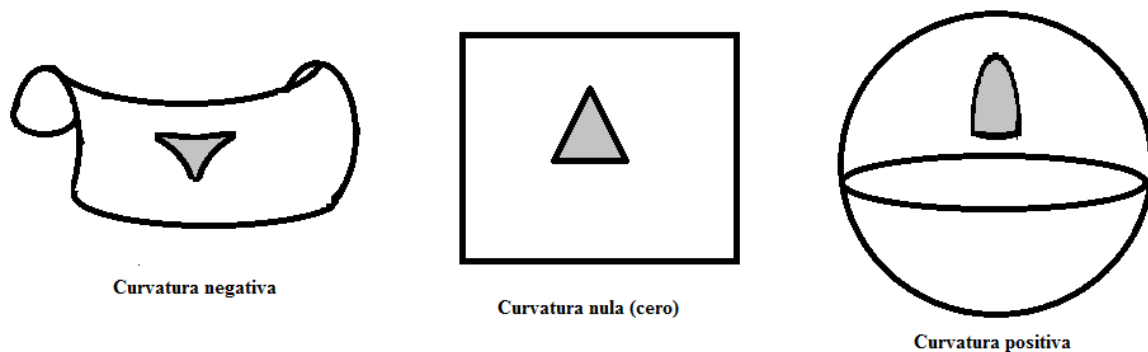


Figura 2.5- Triángulos representados en tres tipo de curvatura, de izquierda a derecha; en curvatura negativa, en curvatura nula y en curvatura positiva. Observando los ángulos del triángulo del lado izquierdo podemos entender, por ejemplo, porque Lobachevski concluyó que en su geometría (de curvatura negativa) la suma de los ángulos interiores de un triángulo suma menos de 180° .

Otro desarrollo de Riemann, que también había sido anticipado por Gauss, se relacionó con la manera en que las propiedades geométricas de una superficie curva de dos dimensiones pudieran ser expresadas sin recurrir al espacio tridimensional que las contiene. A estas propiedades se les llamó intrínsecas y debían ser independientes de la deformación sin estirar o comprimir en el espacio tridimensional. La dificultad que esto representaba se le había ocurrido a Gauss cuando éste trabajó como consejero científico para los proyectos cartográficos del gobierno de Hannover. “Una vez más vemos que, considerado históricamente, las teorías abstractas del espacio deben su existencia a la práctica del trabajo geodésico, justo como la geometría antigua se origino en la práctica antigua de la topografía” (Jammer, 1993:152). Para abordar estas características geométricas, Gauss y, posteriormente, Riemann utilizaron una expresión que llegó a ser conocida como tensor métrico. En lenguaje moderno, esta expresión da el factor de conversión para pasar distancias de una superficie con una determinada curvatura a otra. Podemos entenderlo de la siguiente forma: supongamos, por ejemplo, que queremos pasar el mapa de un globo terráqueo a un mapa plano. Sabemos que al intentar envolver una esfera con un trozo de papel habrá zonas en que el papel y la esfera coinciden perfectamente, pero en otras partes el papel no se adaptará a la esfera. Podemos guiarnos con la figura 2.6, en este caso el tensor métrico dará un factor de conversión igual a 1 en todas direcciones cerca del ecuador, mientras que cerca de los polos el factor es más grande en dirección norte-sur y más pequeño en dirección este-oeste debido a que la distancia entre dos líneas de igual longitud aumenta, mientras que líneas de igual latitud disminuyen al pasarlas al mapa plano. Así uno puede utilizar el tensor métrico para relacionar superficies con curvaturas diferentes entre sí. Estas y otras herramientas matemáticas para estudiar las propiedades de las geometrías no euclidianas tuvieron un gran impacto en el desarrollo de las matemáticas.

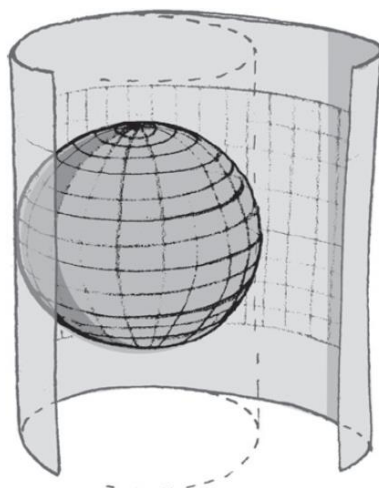


Figura 2.6- Si pasamos coordenadas de una esfera a un plano, de la manera que se muestra, encontramos que podemos hacer coincidir las superficies cerca del ecuador, pero conforme nos acercamos a los polos esto se hace más difícil y necesitamos alterar las distancias, para esto es que Gauss y Reimann utilizan el concepto de métrica. Imagen tomada de Janssen (2014:183).

Los estudios de Gauss, Lobachievski, Bolyai y Riemann fueron cobrando importancia a medida que se acercaba el cambio de siglo. Otros matemáticos importantes que hicieron aportaciones relevantes fueron principalmente Gregorio Ricci (1853-1925), Eugenio Beltrami (1835-1900), Elwin Bruno Christoffel (1829-1900), Luigi Bianchi (1856-1928) y Hermann Weyl (1885-1955). El resultado de estas investigaciones en geometrías no euclidianas fue la creación de una serie de herramientas matemáticas que abrían la posibilidad de hacer modelos formales sobre la naturaleza que no estuvieran limitados de la misma manera que aquellos que se basaban en la geometría de Euclides.

Sin embargo, no estaba muy claro cómo aplicar estas nuevas herramientas en las ciencias naturales. Los intentos en el siglo XIX, como los del propio Lobachievski, de utilizar mediciones astronómicas para establecer si la geometría del espacio era, de hecho, euclidiana o no, resultaron poco fructíferos. “En contraste con la cantidad de publicidad que recibieron, la aplicación de geometrías no euclidianas en física por parte de destacados profesionales produjo escasos resultados teóricos, el valor de los cuales fue sobrepasado por la complejidad de los métodos implementados para obtenerlos” (Walter, 1999:94). Por si fuera poco, durante la segunda mitad del siglo XIX, no sólo no estaba claro si los nuevos sistemas de geometría podían ser de utilidad para los físicos, sino que tampoco parecía haber manera de saber si el universo se comportaba de acuerdo con un sistema geométrico determinado.

Respecto de esta cuestión, Henri Poincaré (1854-1912) defendió una postura conocida como convencionalismo. Para Poincaré utilizamos una u otra geometría por razones de convención, ya que no hay manera de determinar cómo es realmente la geometría de nuestro universo. Si, por ejemplo, viviéramos en un universo con una geometría como la de Lobachievski e intentáramos medir los ángulos internos de un triángulo, nuestros instrumentos de medición se distorsionarían

de la misma manera que los ángulos del triángulo por lo que terminaríamos pensando que sí suman 180° . “Entonces, espacio absoluto, tiempo absoluto, e incluso la geometría no son condiciones impuestas en la mecánica. Todas estas cosas no se presuponen en la mecánica más de lo que el lenguaje francés puede decirse que se presupone lógicamente a las verdades expresadas en francés” (Poincaré 1905:102).

Por otro lado, Michael Friedman (2014) reconstruye, entre otras cosas, la relación entre la filosofía de Kant y los debates sobre la conexión entre la geometría y la física. Es bien conocida la importancia que la geometría euclidiana tenía para el sistema filosófico de Kant, él había considerado a la geometría euclidiana como verdadera, pero no porque se basara en algún tipo de experiencia particular, es decir, no era resultado de la investigación empírica a pesar de que sí funcionara como una descripción genuina del mundo físico. “Kant concluyó, en consecuencia, que la geometría euclidiana no es meramente una ciencia lógica o analítica que emerge del entendimiento o intelecto puro, sino que es más bien una ciencia esencialmente sintética o no-lógica que articula la estructura de lo que él llama la forma sensible pura de nuestra intuición o percepción espacial” (Friedman 2014:398). Dado que, para Kant, la geometría euclidiana viene ligada a nuestra percepción del espacio, ésta necesariamente debe ser parte, también, de nuestra descripción del mundo físico. No es difícil ver por qué el descubrimiento de las geometrías no euclidianas parecía ser una dificultad para el sistema de Kant. Sin embargo, había otras maneras de plantear la relación entre la geometría y nuestra percepción del espacio. Felix Klein (1849-1925) llevó a cabo lo que Friedman entiende como una generalización de las ideas de Kant. Para Klein, la geometría matemática describe las características más abstractas de nuestra percepción del espacio. “Estas características no son suficientemente específicas o precisas como para llevarnos a la geometría euclidiana en particular, sino sólo a la estructura que es común a las tres geometrías clásicas de curvatura constante (la euclidiana de curvatura cero, la hiperbólica de curvatura negativa y la elíptica o de curvatura positiva)” (Friedman 2014:407). Conectado con esta tradición Hermann von Helmholtz (1821-1894) intentó llegar a algunos de los supuestos fundamentales de Riemann a partir de sus investigaciones psicológicas y fisiológicas en la percepción del espacio. Helmholtz partía de la idea de que nuestra concepción del espacio se forma mediante un proceso de aprendizaje que se basa en la manera en que experimentamos el movimiento de los cuerpos con los que interactuamos. Así, para Helmholtz, nuestra concepción de la geometría debe ser tal que permita el movimiento de cuerpos rígidos. “Por lo tanto la visión de Helmholtz es kantiana en la medida que el espacio tiene una forma necesaria expresada en la condición de ‘movilidad libre’, pero es empirista en la medida que cuál de las tres geometrías funciona es algo que se determina por la experiencia” (Friedman 2014:408).

En otras palabras, la geometría se había utilizado en física mediante mediciones, cada eje en un plano cartesiano representaba mediciones de distancia, pero, ahora, como señaló Poincaré, las mediciones no pueden ayudarnos a distinguir entre geometrías. Las posturas más relevantes que quedan son, por un lado, el convencionalismo de Poincaré, para quién la elección es una convención, y por otro lado Helmholtz quien considera que la geometría se determina a partir de

nuestra experiencia con el movimiento de cuerpos rígidos. Para Poincaré la solución de Helmholtz no es adecuada porque nuestra noción de cuerpo rígido, en primer lugar, es una idealización y, en segundo lugar, es un concepto que consiste en la idea de un cuerpo cuya densidad y tamaño es constante y la misma idea de tamaño requiere ya una noción de dimensiones espaciales, es decir, presupone una geometría, misma que se iba a determinar a partir de la noción de cuerpo rígido, en pocas palabras el razonamiento es circular.

Debido a que no llegó a producirse una propuesta exitosa acerca de cómo aplicar la geometría no euclidiana a la física durante el siglo XIX, estos avances en matemáticas no tuvieron un papel relevante en los desarrollos en las mediciones de la luz y los parámetros electromagnéticos. En particular, no proporcionaron una solución a las dificultades que el éter había supuesto. Sin embargo, los nuevos sistemas de geometría sí abrieron posibilidades, es decir, hacían posible concebir descripciones de fenómenos físicos de maneras que nunca antes se habían considerado.

En resumen, en este capítulo he mostrado cómo a pesar de la integración de la óptica y el electromagnetismo, la búsqueda de datos experimentales que permitieran establecer una concepción coherente de éter resultó ser infructuosa. Era claro que no se podía detectar el movimiento del viento del éter como esperaba Fresnel, pero un éter como el de Stokes, que parecía ser apoyado por los investigadores del electromagnetismo y el resultado de Michelson de 1881, no era fácilmente conciliable con el coeficiente de arrastre de Fresnel confirmado por Fizeau y Michelson. Los datos parecían sugerir que el éter no era afectado en su movimiento como lo sugería Stokes, pero la investigación tampoco mostraba los efectos que se esperaban de un éter total o parcialmente estacionario. Adicionalmente, los nuevos desarrollos en geometría, durante el siglo XIX, no parecían útiles para resolver esta cuestión como muestra el hecho de que no tuvieron impacto en las investigaciones sobre el movimiento de la luz y el éter en esta época. Incluso hubo intentos por parte de Hertz de hacer representaciones geométricas del cálculo variacional para el estudio de la mecánica, pero con poco éxito y generando fuertes críticas. En el siguiente capítulo, analizo cómo los esfuerzos para evitar esta contradicción llevarían al gran físico H. A. Lorentz a acercarse de manera notable a lo que hoy conocemos como relatividad especial, resultados que fueron alcanzados aun sin recurrir a los nuevos sistemas geométricos.

Capítulo 3

La solución de Lorentz y Poincaré. Rescatando al éter.

Si el éter existe, o no, importa poco, dejemos eso a los metafísicos; lo que es esencial para nosotros es que todo pasa como si existiera... (H. Poincaré, *Science and Hypothesis*)

1.- Introducción

Las mediciones de la velocidad de la luz llevadas a cabo mediante experimentos terrestres, en especial las de Michelson y Morley, mostraron con más claridad que nunca lo inadecuados que resultaban los principios físicos acerca del éter que se habían propuesto hasta finales del siglo XIX. Durante esta época se presentaron diversos intentos de solución que buscaban dar cuenta de la contradicción que parecían indicar los datos experimentales en la investigación de fenómenos asociados con el éter lumínico. Una de las más exitosas fue la de H. A. Lorentz que luego fue modificada por H. Poincaré por lo que me referiré a ella como la solución de Lorentz-Poincaré. Este intento de solución se desarrolló paulatinamente durante las últimas décadas del siglo XIX e inicios del XX. Comenzó como un intento por parte de Lorentz de modificar las hipótesis sobre la naturaleza del éter de Fresnel y Stokes con el fin de explicar los resultados experimentales que se habían obtenido. Lorentz fue formulando estas modificaciones de una manera cada vez más clara y sistemática al tiempo que se producían nuevos experimentos de los que también había que dar cuenta. Este proceso fue influenciado por las aportaciones de Poincaré quién, a partir de sus reflexiones filosóficas, llegó a considerar a las conclusiones de Lorentz como insatisfactorias y realizó sus propias formulaciones.

El objetivo de este capítulo es analizar esta solución de Lorentz y Poincaré a las dificultades que el desarrollo de la práctica de medición de la velocidad de la luz había encontrado. En otras palabras, lo que busco es identificar qué componentes de la práctica de medición decidieron preservar estos investigadores, qué elementos disidieron cambiar o modificar y con qué consecuencias. Veremos que ellos modifican el principio físico del éter para preservarlo y crean un modelo matemático que elimina de los cálculos los efectos que anteriormente se pensaba que el éter debía producir. Esto permitirá identificar con claridad los alcances y límites de esta solución.

Con todo, antes de comenzar la revisión histórica hay que aclarar que Lorentz y Poincaré tenían proyectos diferentes y ninguno de sus artículos fue escrito de manera conjunta. Sin embargo, cada uno se apoyó en el otro en cada etapa del desarrollo de su pensamiento, de manera que, como se verá, el artículo de Poincaré de 1906 debe tantos elementos a Lorentz que considero más adecuado referirme a estas ideas como la solución de Lorentz-Poincaré, pero no pretendo que no existieran desacuerdos entre ambos autores.

2.- Primeras investigaciones de Lorentz sobre el éter y la corrección al experimento de Michelson

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) fue un físico de origen holandés cuyas aportaciones a la electrodinámica fueron, posiblemente, las más relevantes a finales del siglo XIX e inicios del XX, muchas de sus ideas fueron el punto de partida para la relatividad. Con todo, Lorentz siempre defendió la existencia del éter, pero al hacerlo tratando de dar cuenta de los datos experimentales fue modificando sus concepciones hasta acercarse, de manera notable, a lo que hoy conocemos como relatividad especial. Podemos exponer este proceso comenzando con un artículo que Lorentz publicó en 1886 titulado *De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux*. Para este momento los estudios de Hertz y Michelson habían llamado la atención de Lorentz sobre el asunto del éter. En su artículo, Lorentz analizaba el debate entre la hipótesis de Stokes sobre el éter y la de Fresnel. Comienza describiendo la aberración estelar y a continuación plantea las condiciones que el éter de Stokes tendría que cumplir para explicar este fenómeno. Lorentz concluye que dos de los requerimientos de Stokes, que la velocidad del éter sea nula con respecto a la Tierra cerca de la superficie de ésta y que la velocidad relativa tenga potencial (propiedad matemática de un fluido que se comportara como el éter propuesto por Stokes), son incompatibles. Stokes necesitaba el primer requerimiento para explicar la ausencia de efectos del éter en los experimentos hechos en Tierra y el segundo para explicar la aberración estelar de manera similar a la de Bradley. Pero, Lorentz también reconoce la posibilidad de modificar la hipótesis de Stokes para evitar esta dificultad e incluir el coeficiente de arrastre de Fresnel rechazando el requerimiento de que el éter no tenga velocidad en la superficie de la Tierra, es decir, que el éter no participa del movimiento de la Tierra. Con todo, Lorentz señala que sólo sería posible llegar a una conclusión en el debate considerando los resultados experimentales que se habían producido hasta ese momento. Después de comentar diversos experimentos relacionados al éter, como el de Fizeau, Lorentz pasa a analizar el experimento de Michelson de 1881 (descrito en el capítulo anterior) que parecía implicar la necesidad de aceptar una velocidad nula del éter con respecto a la Tierra. Lorentz señala que el cálculo de Michelson acerca del desplazamiento que debería observarse en las franjas de interferencia, de acuerdo con un éter como el de Fresnel, estaba equivocado. Esto se debía a que Michelson sólo consideraba los efectos del movimiento de la Tierra, a través del éter, en la luz que pasa por uno de los brazos, asumiendo que el otro no era afectado. Sin embargo, Lorentz señala que el otro brazo, el que es orientado perpendicularmente al movimiento de la Tierra, también afecta ligeramente a la trayectoria que sigue el rayo de luz en él. (Figura 3.1).

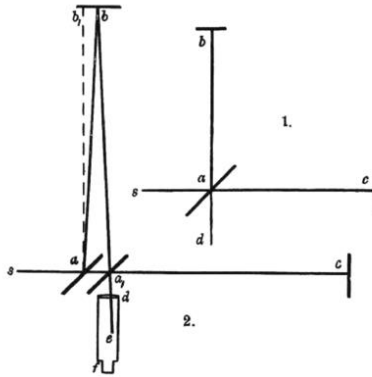


Figura 3.1- Movimiento del dispositivo experimental de Michelson a través del éter. (Imagen tomada de Michelson y Morley 1887:335)

El razonamiento de Lorentz es como sigue: si suponemos que el aparato se encuentra en movimiento en la dirección de uno de los brazos, paralelo al movimiento de la Tierra, con una velocidad v medida respecto del sistema inercial definido por el éter, entonces la luz que va en dirección del otro brazo y de regreso debe atravesar el éter formando un ángulo tal que la velocidad resultante se dirigirá ligeramente hacia la dirección del primero (Figura 3.2).

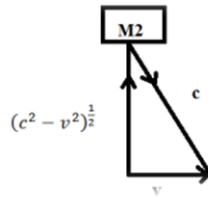


Figura 3.2- Trayectoria que sigue un rayo de luz que pasa por el interferómetro en movimiento a través del éter visto desde el marco de referencia del éter.

El tiempo que le toma a la luz ir y regresar por este brazo sería entonces:

$$t_2 = \frac{2l_2}{(c^2 - v^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{3.1}$$

La diferencia entre los tiempos que le toma a la luz ir y regresar en cada brazo, para v mucho más pequeña que c , viene dada aproximadamente por:

$$\Delta = t_1 - t_2 \approx \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) \approx \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{2l_1 v^2}{c^3} - \frac{l_2 v^2}{c^3} \tag{3.2}$$

Si a continuación hacemos girar todo el aparato 90° obtenemos una nueva diferencia de tiempos:

$$\Delta' = \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{l_1 v^2}{c^3} - \frac{2l_2 v^2}{c^3} \quad (3.3)$$

Esto generará un corrimiento determinado de franjas, dicha cantidad δ estará dada por:

$$\delta = \frac{(l_1 + l_2)v^2}{\lambda c^2} \quad (3.4)$$

Si además hacemos a l_1 y l_2 iguales a l obtenemos:

$$\delta = \frac{2\left(\frac{v}{c}\right)^2}{\frac{\lambda}{l}} \quad (3.5)$$

Si comparamos esta última expresión matemática con la que se utilizó en experimento de 1881 (2.12) vemos que el valor para este desplazamiento se reduce a la mitad. Y por lo tanto, Lorentz considera que el resultado de Michelson de 1881 no constituye una dificultad para mantener que el éter sí tiene velocidad con respecto a la Tierra en la superficie de ésta. Al igual que Lorentz, otros investigadores como Alfred Potier (1840-1905) hicieron el mismo señalamiento respecto del cálculo de Michelson y pidieron una repetición del experimento con las correcciones adecuadas. Michelson y Morley hicieron esto en 1887 con un interferómetro mejorado. Dichas mejoras consistieron en alargar el camino óptico de la luz en el interferómetro de 1.2m a 11m y colocaron el dispositivo sobre mercurio para reducir la fricción en el aparato al rotarlo. Pese a todo, el resultado confirmó nuevamente el resultado obtenido en 1881, no había movimiento en las franjas, por lo que Michelson y Morley concluyeron: “Lorentz entonces propone una modificación que combina algunas ideas de Stokes y Fresnel, y asume la existencia de un potencial, junto con el coeficiente de Fresnel. Si ahora fue legítimo concluir del presente trabajo que el éter está en reposo con respecto a la superficie de la Tierra, de acuerdo con Lorentz no podría haber un potencial de velocidad, y su propia teoría también falla” (Michelson y Morley 1887:341).

3.- El teorema de estados correspondientes, la hipótesis de contracción y el electrón

Con todo, Lorentz continuó sus reflexiones sobre el éter y comenzó a buscar una hipótesis que explicara la relación entre éste y la materia. A inicios de 1890s investigadores como Larmor, Wiechert y el propio Lorentz propusieron, independientemente, modelos moleculares sobre la electricidad que implicaban un éter estacionario. De dichas propuestas, la de Lorentz fue la más exitosa. Lo que Lorentz propuso en 1892 implicaba modificar el principio físico del éter al considerar que existían *partículas microscópicas cargadas* en todas las moléculas de cuerpos materiales. Serían estas partículas las que interactuarían con el éter estacionario, de tal manera que, por ejemplo, el movimiento de la luz, al pasar por medios materiales como el agua, sería

afectado por las *partículas cargadas* que posee cada molécula del agua. La idea era que la luz generaría vibraciones armónicas en las partículas del cuerpo al incidir en ellas, dicha vibración produciría ondas de luz que interferirían entre sí y con la onda de luz original, esto tendría como consecuencia que sólo la luz es afectada al pasar por un cuerpo y no propiamente el éter. Partiendo de esta idea, Lorentz fue capaz de recuperar el misterioso coeficiente de arrastre de Fresnel sin postular que el éter participara del movimiento de la Tierra. De esta forma Lorentz podía explicar la interacción entre la materia y un éter completamente estacionario y que tenía al coeficiente de arrastre como una consecuencia natural. El éter de Lorentz no se movería con la materia ni siquiera parcialmente, los fenómenos que habían llevado a Fresnel a aceptar que la materia podía transmitir un pequeña parte de su movimiento al éter podían explicarse por la interacción entre estas *partículas microscópicas* y las ondas de luz.

Adicionalmente, Lorentz encontró una manera de evitar una dificultad que se presentaba al aplicar la electrodinámica a cuerpos en movimiento. La dificultad se relacionaba a la invariancia respecto de marcos de referencia. Las leyes de la física que funcionan en las coordenadas de un marco de referencia inercial funcionan en las de cualquier otro marco de referencia, siempre que también sea inercial, a esto se le conoce como invariancia. Las ecuaciones que se usaban en la física clásica para transformar cualquier cantidad o coordenada de un marco de referencia a otro son conocidas actualmente como transformaciones galileanas. Dado que la física no parecía cambiar de un marco de referencia inercial a otro, se esperaba que cualquier ecuación que relacionara diferentes cantidades físicas pudiera pasarse de un marco de referencia a otro, mediante transformaciones galileanas, sin alterar las relaciones que establecen. Sin embargo, las ecuaciones de Maxwell no tienen esta propiedad, sólo parecen funcionar adecuadamente en un marco de referencia en reposo con respecto al éter. Debido a esto, Lorentz comenzó a desarrollar una técnica de análisis en sus trabajos de 1892 que expuso de manera más sistemática en su libro de 1895 titulado *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Dicha técnica consistía en, dado un sistema electromagnético en un marco de referencia particular, considerar un sistema ficticio de coordenadas que dependiera de la velocidad del marco de referencia con respecto al éter y utilizarlas para remplazar con ellas a las coordenadas reales, de manera similar remplazaba los campos eléctricos y magnéticos por otros ficticios. Las transformaciones ficticias que utilizó eran tales que las ecuaciones de Maxwell son las mismas, aproximadamente, al pasar de un marco de referencia en reposo, con respecto al éter, a uno en movimiento. En otras palabras, Lorentz cambiaba el estado electromagnético real, en movimiento, por uno ficticio en reposo con respecto al éter mediante unas transformaciones distintas a las galileanas. Así, a partir de soluciones en el sistema ficticio, en reposo respecto al éter, utilizaba las transformaciones inversas para obtener soluciones para el sistema real, en movimiento respecto al éter. Se conoció como teorema de estados correspondientes al resultado por el que Lorentz mostraba que, a partir de la solución a un problema electrodinámico en su sistema ficticio, podía obtenerse una solución para el sistema real.

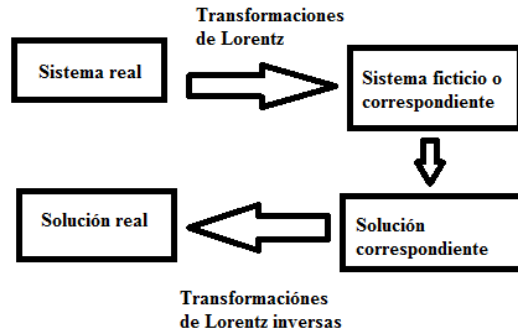


Figura 3.3- Teorema de estados correspondientes de Lorentz

Las transformaciones que proponía eran:

$$t' = t - \frac{vx}{c^2} \quad (3.6)$$

$$D' = D + \frac{1}{c} v \times H \quad (3.7)$$

$$H' = H - \frac{1}{c} v \times E \quad (3.8)$$

Donde t representa el tiempo, c la velocidad de la luz, D , H , y E son vectores que caracterizan el campo electromagnético y las cantidades t' , D' y H' representan los valores del estado correspondiente en el nuevo marco de referencia. Particularmente importante en el desarrollo posterior fue la cantidad t' a la que se llamó *tiempo local* debido a su dependencia de la posición x . Para Lorentz ninguna de estas cantidades nuevas tenían significado físico, su función era simplificar los cálculos y no representar cantidades reales.

Estas aportaciones permitieron a Lorentz analizar y dar cuenta de diversos fenómenos electromagnéticos en movimiento, además, de los experimentos llevados a cabo para detectar los efectos del éter. Sin embargo, aun fue necesaria una hipótesis adicional para dar cuenta del resultado de Michelson y Morley de 1887. Dado que, en la concepción de Lorentz, el éter era estacionario y los efectos de arrastre parcial sólo los producían los cuerpos materiales sobre la luz, el experimento de Michelson y Morley sí debía haber detectado un desplazamiento de las franjas de interferencia. Es por ello que, hacia el final de su libro de 1895, Lorentz señala que el resultado encontrado por Michelson y Morley, la ausencia de movimiento en las franjas de interferencia, podría explicarse si asumimos que la longitud de los brazos del interferómetro cambia de tal manera que dicho cambio compensara el efecto del viento del éter en el movimiento de la luz. “Si asumimos que el brazo que yace en la dirección del movimiento de la Tierra se acorta más que el otro por $\frac{1}{2}L(v^2/c^2)$, y, al mismo tiempo, que la traslación tiene la influencia que la teoría de Fresnel permite, entonces el resultado de Michelson es explicado completamente” (Lorentz, 1895b,5). Para que esto fuera así el brazo del interferómetro paralelo a la dirección del

movimiento del éter cambiaría en una proporción de 1 a $1+\delta$, y el perpendicular en 1 a $1+\varepsilon$ de manera que:

$$\varepsilon - \delta = \frac{v^2}{2c^2} \quad (3.9)$$

Con ε y δ como los factores desconocidos que daban lugar a la contracción. Para justificar esta hipótesis, Lorentz señala que dicha contracción sería de esperarse si asumimos que las fuerzas moleculares se transmiten a través del éter de la misma manera que las fuerzas eléctricas y magnéticas. La rigidez de un cuerpo está relacionada a la intensidad de las fuerzas entre sus moléculas, pero si dichas fuerzas también se transmitieran a través del éter entonces el viento de éter afectaría sus dimensiones de la misma manera en que se creía que afectaba a la velocidad de propagación de la luz. Esta *hipótesis de contracción* también fue propuesta de manera independiente por George Francis FitzGerald (1851-1901), por ello se le ha llamado contracción Lorentz-FitzGerald o sólo *hipótesis de contracción*.

En resumen, hasta este punto las aportaciones de Lorentz eran i) la idea de un éter completamente estacionario, ii) una explicación coherente del coeficiente de Fresnel, iii) la idea de que la materia y el éter interactuaban a través de partículas microscópicas cargadas, iv) el teorema de estados correspondientes y v) la hipótesis de contracción. Estas ideas de Lorentz recibieron un nuevo impulso debido a dos descubrimientos experimentales cuyos resultados eran fácilmente explicados a partir de la idea de partículas microscópicas cargadas dentro de las moléculas que Lorentz había propuesto. El primero fue el realizado por Pieter Zeeman (1865)-1943), a finales de 1896, en el que observó los efectos de un campo magnético en las líneas del espectro de emisión del potasio. La vibración de las *partículas cargadas* de Lorentz (también llamadas *iones*) no se veía afectada en la dirección paralela al campo magnético, pero si en la dirección perpendicular, Lorentz infirió que esto debería causar que una de las líneas se dividiera en dos al ser observadas en dirección paralela al campo y en tres en la dirección perpendicular. La confirmación de este resultado por parte de Zeeman dio una mayor credibilidad a Lorentz y a la idea de que las *partículas microscópicas* que proponía eran responsables de las propiedades electromagnéticas de la materia. El otro experimento fue el de Thomson sobre rayos catódicos. Lorentz había supuesto que los rayos catódicos estaban compuestos por *partículas* mucho más pequeñas que los átomos. Las observaciones respecto de los rayos catódicos arrojaban un valor elevado para la proporción entre carga y masa de las partículas que formaban estos rayos. La proporción carga masa que Lorentz infería de los rayos catódicos y del efecto de Zeeman permitía obtener el mismo valor para la carga de estas *partículas* que para *el cuanto electrolítico*. Lorentz comenzó a referirse a sus partículas microscópicas cargadas como iones o *electrones* en conformidad con el nombre que Goerge Johnstone Stoney dio al mencionado cuanto electrolítico.

Aun había que esperar por experimentos que apoyaran otros elementos de sus ideas, pero Lorentz continuó perfeccionándolas. En su trabajo de 1899, Lorentz expuso una versión más

acabada de las transformaciones que utiliza en el teorema de estados correspondiente. Tomando un factor indeterminado l , c la velocidad de la luz, v la velocidad de desplazamiento en el éter, x , y , z y t las variables de posición y tiempo en el sistema en movimiento y x' , y' , z' y t' las variables del sistema ficticio, Lorentz dedujo las siguientes transformaciones:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{lc}{\sqrt{c^2 - v^2}}x \\y' &= ly \\z' &= lz \\t' &= lt - \frac{lv}{c^2 - v^2}x\end{aligned}\tag{3.10}$$

Sin embargo, Lorentz consideraba a estas transformaciones como incompletas pues aun había que agregar la hipótesis de contracción para dar cuenta de experimentos en los que se requiera una precisión como la del experimento de Michelson y Morley. Para ello, Lorentz agrega a las ecuaciones, para las coordenadas espaciales x' , y' y z' , un coeficiente indeterminado ϵ que modificaría las dimensiones de los cuerpos de tal manera que cualquier experimento como el de Michelson no detecte ningún efecto debido al movimiento de los cuerpos a través del éter. La explicación de este coeficiente seguía siendo la misma, que las fuerzas moleculares se propagan a través del éter produciendo ligeras modificaciones en los cuerpos que se desplazan con respecto a él. Esta hipótesis de contracción de las dimensiones de los cuerpos tenía nuevas implicaciones debido a que no era una simple estrategia de cálculo, como el tiempo local, sino que era resultado de un proceso físico real consecuencia de las fuerzas moleculares.

4.- Experimentos de algunos científicos para someter a prueba la concepción de éter de Lorentz

Durante los primeros años del siglo XX se produjeron nuevos experimentos para detectar los efectos que el éter de Lorentz debía presentar en mediciones con una precisión similar a la del experimento de Michelson. Los tres experimentos que resultaron relevantes en el desarrollo de las ideas de Lorentz fueron el realizado por John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh, (1842-1919), el de DeWitt Bristol Brace (1859-1905) y el de Frederick Thomas Trouton (1863-1922) y Henry R. Noble.

Lord Rayleigh se propuso poner a prueba la hipótesis de contracción de Lorentz mediante un experimento de doble refracción. Al igual que en el experimento de Michelson el efecto debía ser de una proporción en 10^8 . Para ello Rayleigh supuso que si los cuerpos se contraen al moverse a través del éter, entonces tal contracción podría generar una anisotropía, es decir, podría hacer que un cuerpo transparente, sobre el que incide un haz de luz, refractara dos rayos polarizados en direcciones diferentes. Rayleigh instaló un tubo de 76 cm en un tablero rotante, el cual estaba

cerrado con vidrio en sus extremos y contenía bisulfuro de carbón. La luz proveniente de una lámpara eléctrica se hacía pasar a través de un prisma de nicol (un prisma que divide un rayo de luz en dos polarizados), atravesaba el tubo, después llega a un segundo prisma de nicol y a continuación se refleja para regresar por el mismo camino. El experimento se hizo primero con el tubo paralelo al movimiento de rotación de la Tierra (este-oeste) y después perpendicular (norte-sur). La idea era que los materiales tuvieran índices de refracción diferentes tales que si se producía una contracción, como la que suponía Lorentz, entonces se observaría una doble refracción debido a que el cambio en la densidad afectaría dichos índices. Sin embargo, Rayleigh no encontró el efecto esperado. En 1904 Brace llevó a cabo una versión mejorada del experimento en la que utilizó un aparato de más de 4 metros y la luz era reflejada 7 veces, esto con el fin de hacer detectable un efecto mucho más pequeño el que podía detectar Rayleigh.

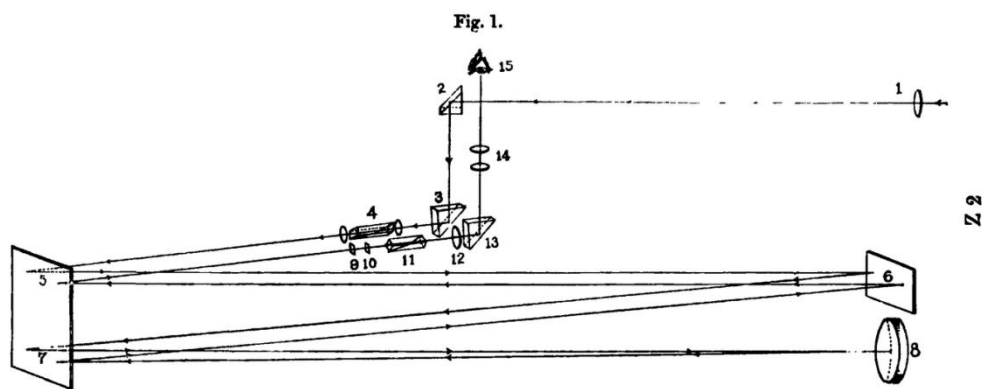


Figura 3.4.- Dispositivo experimental de Brace. Se hace pasar luz solar a través del lente 1 y se refleja en los prismas 2 y 3. A continuación llega a un prisma de nicol y el rayo polarizado pasaba por los espejos 5, 6, 7 y regresaba después de pasar por llegar al 8, pero de manera que no regresaba a 4 sino al sistema 9-11. El lente 12 hacía converger la luz hacia el prisma 13 que reflejaba la luz hacia el telescopio 14. (Tomo la imagen de Brace, 1904:319)

Con todo, Brace tampoco observó la doble refracción que se esperaba como consecuencia de la contracción propuesta por Lorentz.

En 1903 F. Trouton y H. Noble publicaron los resultados de un experimento en el que intentaron detectar un efecto electromagnético que el éter estacionario de Lorentz debía presentar. Si se tiene un capacitor de placas paralelas, con carga, colocado en un dispositivo que le permita rotar libremente y las placas están originalmente orientadas en la dirección del viento de éter, la hipótesis de Lorentz implica que el capacitor debería rotar hasta orientarse en una posición perpendicular al movimiento de la Tierra a través del éter. Esto debido a que, de acuerdo con Maxwell, una carga en movimiento como la del condensador genera un campo magnético perpendicular al movimiento y a las líneas de inducción eléctrica. “Pero cuando las placas del condensador se encuentran perpendiculares a la dirección del movimiento el efecto de las cargas opuestas se neutraliza y no se producirá un campo magnético” (Trouton y Noble 1903:132). Trouton y Noble cargaron un capacitor suspendido con un alambre y calcularon el movimiento

que debía observarse. Después de varios meses concluyeron: “No hay duda de que el resultado es uno puramente negativo, como en otros casos de posible interacción entre el éter y la materia...” (Trouton y Noble, 1903:133).

5.- La aportación de Henri Poincaré y la física de principios

Durante los primeros años del siglo XX el gran matemático y filósofo Henri Poincaré realizó una serie de críticas y aportaciones importantes a los planteamientos de Lorentz. Dichas contribuciones parecen haber sido guiadas por la búsqueda de rescatar ciertos principios generales que Poincaré veía como esenciales para las teorías físicas. Para él, la física debía desarrollarse hasta convertirse en una ciencia en la que unos pocos principios generales guiaran la formación de teorías. Estos principios eran afirmaciones que se originaban como resultado de la generalización de aquellos resultados empíricos que habían alcanzado un grado alto de corroboración experimental, a tal punto que difícilmente podía dudarse sobre su corrección. Ejemplos de éstos eran el principio de inercia o la ley de aceleración (segunda ley de Newton). De acuerdo con Poincaré, dichos principios, aunque eran de origen empírico, actuaban como convenciones o definiciones debido a la utilidad que habían mostrado para dar cuenta de una gran variedad de fenómenos. “Los principios de la dinámica nos parecen primero verdades experimentales, pero hemos sido obligados a usarlos como definiciones” (Poincaré, 1905:118). La importancia que Poincaré atribuía a estos principios se relaciona con su concepción de la ciencia. De acuerdo con dicha concepción, el conocimiento científico consiste principalmente en relaciones objetivas entre los fenómenos, otros elementos como las expresiones matemáticas que utilizamos, las entidades que postulamos, etc. son convenciones: “Entonces, espacio absoluto, tiempo absoluto, e incluso la geometría no son condiciones impuestas en la mecánica. Todas estas cosas no se presuponen en la mecánica más de lo que el lenguaje francés puede decirse que se presupone lógicamente a las verdades expresadas en francés” (Poincaré 1905:102). Sólo las relaciones o las dependencias entre fenómenos expresaban aspectos reales de la naturaleza: “Para Poincaré, los invariantes de la física (que proporcionan conocimiento objetivo) eran las relaciones fijas entre experimentos, relaciones que sobrevivían al siempre cambiante flujo de teorías” (Galison, 2005:88). Por ejemplo, en el caso del éter dijo: “Si el éter existe o no, importa poco, dejemos eso a los metafísicos; lo que es esencial para nosotros es que todo pasa como si existiera y que esta hipótesis parece adecuada para explicar los fenómenos” (Poincaré, 1905:235).

Sin embargo, esto no significa que cualquier otro elemento fuera introducido sin ningún criterio objetivo, sino que, la adopción de una determinada convención se debía a su capacidad para dar cuenta de los fenómenos de la manera más simple o que convengan más a la investigación. Aquellas convenciones cuya adopción hayan demostrado ser las más convenientes en el estudio de un área de la física debían verse como definiciones que guiarán la formación de teorías futuras. “Estos principios reflejan las relaciones verdaderas (*rappports vrais*) entre cantidades físicas sin necesidad de hipótesis físicas especiales” (Katzir, 2005:276). Sin embargo, Poincaré nunca dio un criterio claro para aceptar o rechazar un determinado principio, esto se

establecía mediante un juicio subjetivo basado en el estado del conocimiento en un momento dado.

En el caso de los planteamientos de Lorentz, Poincaré consideraba que, a pesar de sus logros, las conclusiones a las que había llegado estaban en conflicto con los principios de movimiento relativo (el movimiento de cualquier sistema debe obedecer las mismas leyes si es relativo a un punto fijo o uno en movimiento rectilíneo uniforme) y con el de reacción (tercera ley de Newton). El primero debido a que, hasta 1899, las conclusiones de Lorentz aun implicaban efectos detectables debido al movimiento de la Tierra a través del éter, dichos efectos son los mismos que trataron de detectar Rayleigh, Brace, Trouton y Noble. Estos experimentos reforzaron la convicción de Poincaré de que el principio de movimiento relativo debía ser incorporado a la electrodinámica y que Lorentz requería nuevas hipótesis, cada vez que se presentaban experimentos más precisos, debido, justamente, a que no había reconocido la importancia de dicho principio. En cuanto al principio de reacción, Poincaré señaló, en un artículo de 1900 publicado con motivo del 25° aniversario del doctorado de Lorentz, que la suma neta de fuerzas que actúan sobre un electrón, de acuerdo a los planteamientos de Lorentz, en general no se elimina. Poincaré considera que esto puede resolverse reinterpretando los estados correspondientes de Lorentz, ya no como estados ficticios, sino como estados que serían medidos por observadores A y B en movimiento, uno con respecto al otro dentro del éter. En particular, el tiempo local ya no sería ficticio, sino que sería el tiempo que los observadores medirían si sincronizaban sus relojes por medio de señales ópticas:

Para que la compensación funcione, debemos considerar el fenómeno no respecto del tiempo real t , sino respecto de cierto tiempo local t' definido de la siguiente manera. Supongamos que hay algunos observadores colocados en varios puntos, y ellos sincronizan sus relojes usando señales luminosas. Ellos intentan ajustar el tiempo medido de las señales transmitidas, pero ellos no están consientes de su movimiento común, y consecuentemente creen que la señal viaja igualmente rápido en ambas direcciones. Ellos hacen observaciones de señales cruzadas, una viajando de A a B, seguida de otra viajando de B a A. El tiempo local es el indicado por los relojes que son ajustados así (Poincaré 1900:20).

El resultado de esta sincronización coincide con la formulación de Lorentz del tiempo local. Esta es una reinterpretación del tiempo local que Lorentz no parece haber aceptado, sin embargo, es relevante, entre otras cosas, porque Einstein hace uso de una coordinación de relojes casi idéntica para redefinir la simultaneidad. Galison (2005) considera que esto puede deberse a que Einstein leyera a Poincaré o a que ambos trabajaban en proyectos tecnológicos relacionados con la coordinación de relojes a distancia, Einstein en la oficina de patentes y Poincaré en el Bureau de Longitudes. De cualquier manera, la búsqueda de Poincaré de rescatar principios como el de la relatividad sí llevó a Lorentz a reconocer la necesidad de replantear algunas de sus ideas e intentar nuevos desarrollos en sus planteamientos sobre electrodinámica. De acuerdo con la investigación de Darrigol “Poincaré fue único en conjugar los principios generales de la mecánica y la irrelevancia mecánica del éter. Al cambio de siglo, sólo él detectó una crisis y predijo una

alteración mayor de la concepción de Lorentz. Otros teóricos no vieron nada mal en la teoría de Lorentz...” (Darrigol, 2000:360).

6.- Transformaciones exactas. El artículo de Lorentz de 1904

Con todo, Lorentz parece haber retomado sólo algunos aspectos de la crítica de Poincaré. Respecto al principio de reacción, Lorentz contestó en una carta a Poincaré que “la violación del principio de reacción es necesaria dentro de toda teoría que pueda explicar el experimento de Fizeau” (Lorentz, 1901:121). Y respecto a la reinterpretación de los estados correspondientes, Lorentz siguió razonando en términos de estados ficticios. Sin embargo, tanto la crítica de Poincaré como los resultados experimentales de Rayleigh, Brace, Trouton y Noble hicieron necesario que Lorentz sí replanteara algunas de sus ideas. Esto lo hizo en 1904, en un artículo titulado *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity less than that of Light*. El artículo comienza con un repaso de los experimentos mencionados y con una breve mención a Poincaré y sus comentarios respecto de la dificultad para detectar el éter:

Poincaré ha objetado a la teoría existente de fenómenos eléctricos y ópticos de cuerpos en movimiento que, con el fin de explicar el resultado negativo de Michelson, se ha requerido la introducción de una nueva hipótesis, y que la misma necesidad puede ocurrir cada vez que nuevos hechos sean descubiertos. Seguramente este curso de inventar hipótesis especiales para cada nuevo resultado experimental resulta más bien artificial. Sería más satisfactorio si fuera posible mostrar por medio de ciertas suposiciones fundamentales y sin despreciar términos de una orden de magnitud u otra, que muchas acciones electromagnéticas son enteramente independientes del sistema de movimiento”. (Lorentz 1904:12-13)

A continuación, Lorentz analiza las ecuaciones que había desarrollado para la dinámica del electrón considerando el caso en que éste se mueve a velocidad constante v . Luego introduce las mismas ecuaciones, pero ahora referidas a ejes coordenados de un sistema en movimiento, para ello toma las transformaciones deducidas en sus trabajos anteriores (3.10). Adicionalmente, Lorentz considera al factor l como una función de v , de manera que su valor sea la unidad con $v=0$, asegurando con ello que las ecuaciones sean las mismas si no hay movimiento relativo. Posteriormente, Lorentz introduce la hipótesis de que el electrón cambia su dimensión en la dirección de su movimiento y que las fuerzas moleculares se transmiten en el éter (hipótesis de contracción). Lo anterior le permite a Lorentz deducir una expresión para el momento del electrón de la que determina el parámetro l en las ecuaciones 3.10 y lo identifica con la unidad, así todos los términos de las transformaciones quedan determinados. Pero además, Lorentz utiliza su fórmula para el momento del electrón para deducir que la masa del mismo depende de su velocidad y , hacia el final del artículo, argumenta que las masas de todas las partículas son influidas por una traslación del mismo grado que la masa del electrón. Debido a que ahora Lorentz tiene transformaciones exactas, ya no hay consecuencias detectables producidas por el movimiento de la Tierra a través del éter sin importar la precisión de los experimentos ópticos como los de Michelson-Moreley, Rayleigh y Brace. En cuanto al experimento de Trouton y Noble, Lorentz explica que si consideramos la hipótesis de contracción, el único efecto del

movimiento de la Tierra en el éter debe ser una contracción de todo el sistema de electrones y otras partículas en el dispositivo y que tal contracción no da lugar a un cambio sensible de dirección. Aunque las transformaciones obtenidas por Lorentz son parecidas a las utilizadas en la actualidad no son idénticas, y Zahar (1973) considera que existe un error en la transformación utilizada para la densidad de carga ρ : “El error de Lorentz en la ecuación de transformación para ρ es, por lo tanto, profundamente significativa. Se deriva de la dificultad que presenta la interpretación física del tiempo local.” (Zahar, 1973:119). En otras palabras, aunque Lorentz logra dar cuenta de los nuevos experimentos con ecuaciones exactas, sin introducir nuevas hipótesis para cada orden de aproximación, su explicación no incluye una invariancia completa al cambiar marcos de referencia inerciales, posiblemente esto se deba a que aun consideraba que era posible detectar el éter en principio.

7.- La formulación de Poincaré en 1906

Poco después de la publicación del artículo de Lorentz de 1904, Poincaré encontró la manera de incorporar completamente el principio de movimiento relativo (o relatividad) en la electrodinámica, modificando las últimas transformaciones de Lorentz, para hacer al éter completamente indetectable. Para Poincaré: “Parece que la imposibilidad de detectar el movimiento absoluto de la Tierra por experimentos puede ser una ley general de la naturaleza; estamos naturalmente inclinados a admitir esta ley, que llamaremos el Postulado de Relatividad y lo admitiremos sin restricción” (Poincaré, 1906:1). En su artículo sobre la dinámica del electrón publicado en 1906, Poincaré señala que Lorentz extendió su hipótesis, en 1904, a todo tipo de fuerzas, fueran de origen electromagnético o no, y que esto requeriría modificar las leyes de gravitación dado que los efectos de la gravedad tendrían que propagarse a la velocidad de la luz, y no de manera instantánea como se creía. Poincaré requiere que esto sea así para asegurar que el movimiento de la Tierra a través del éter sea realmente indetectable en principio. Él especula que, si es el caso que la velocidad de la luz y la de los efectos gravitacionales en la misma, esto será consecuencia de que ambos se transmiten en virtud del éter. Habiendo dicho esto, Poincaré procede a utilizar las transformaciones de Lorentz para obtener la ecuación para la densidad de carga, corrigiendo la obtenida por Lorentz en 1904. Posteriormente, concluye que las ideas de Lorentz explicarían la imposibilidad de detectar el éter si todas las fuerzas fueran de origen electrodinámico, pero que este no es el caso dado que dos sistemas de cuerpos que producen campos electromagnéticos equivalentes pueden no ejercer la misma acción gravitacional. En otras palabras, Poincaré no considera que la gravitación sea de origen electromagnético por lo que pasa a estudiar las transformaciones aplicadas a la propagación de la gravitación y en el proceso muestra que las transformaciones de Lorentz, como él las reconstruye, forman un grupo. En matemáticas, se conoce como grupo a una estructura algebraica, conformada por un conjunto y una operación, que satisface diversas propiedades. Al mostrar que las transformaciones pueden ser vistas como las operaciones de un grupo, Poincaré puede apelar a las propiedades de los grupos simplificando los cálculos, en comparación con Lorentz, para deducir expresiones que permitan transformar otras cantidades físicas y concluye con expresiones matemáticas, para la

gravitación, compatibles con las transformaciones de Lorentz. Adicionalmente, Poincaré también muestra que las transformaciones pueden verse como rotaciones en un espacio que deja invariante la forma cuadrática $x^2+y^2+z^2-ct^2$.

Transformaciones galileanas	$t'=t$
	$x'=x-vt$
	$y'=y$
	$z'=z$
$\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$	
Transformaciones de Lorentz 1904	$t' = \gamma [(t/\gamma) - (v x/c^2)]$
	$x' = \gamma [x - vt]$
	$y' = y$
	$z' = z$
Transformaciones de Lorentz-Poincaré 1906	$t' = \gamma (t - vx/c^2)$
	$x' = \gamma (x - vt)$
	$y' = y$
	$z' = z$

Figura 3.5.- Ecuaciones para la transformación de coordenadas de un marco de referencia inercial a otro.

La solución de Lorentz, en su versión modificada por Poincaré, muestra ya muchos de los rasgos asociados a la relatividad especial de Einstein. Elementos propios de la relatividad especial tales como la imposibilidad de detectar el movimiento absoluto, la interpretación del tiempo local como consecuencia de la coordinación de relojes por medio de señales lumínicas, las transformaciones de Lorentz en su forma moderna y la idea de que la gravedad no es instantánea, sino que sus efectos se propagan, a lo más, a la velocidad de la luz, están todos presentes en el artículo de Poincaré de 1906. Como se mencionó, incluso está presente la posibilidad de ver a las transformaciones de Lorentz como rotaciones en un espacio de cuatro dimensiones en la que el tiempo funciona como una de las coordenadas. En pocas palabras, hay una cantidad importante de elementos comunes, a tal punto que autores como Edmund T. Whittaker han llegado a cuestionar la prioridad de Einstein sobre la teoría de la relatividad especial concediéndole a éste sólo un papel menor en el desarrollo de la relatividad. Whittaker titula al segundo capítulo de su libro sobre las teorías del éter como “La teoría de la relatividad de Lorentz y Poincaré” y respecto al trabajo de Einstein de 1905 sólo menciona que “En otoño del mismo año, en el mismo volumen de los *Annalen der Physik* que su artículo sobre el movimiento browniano, Einstein publicó un artículo que explicaba la teoría de la relatividad de Poincaré y Lorentz con algunas ampliaciones y que atrajo mucha atención” (Whittaker, 1953:40).

Sin embargo, son pocos los que comparten esta opinión que asigna tan poca importancia al artículo de Einstein, ya que, como hemos visto, Lorentz y Poincaré no reformularon los conceptos de espacio y tiempo ni abandonaron la noción de éter. El tiempo local era visto por Lorentz como un elemento que facilitaba los cálculos, pero sin realidad física, y Poincaré lo veía como un tiempo aparente al que distingue del tiempo verdadero. Por otra parte, la contracción era vista, por ambos, como un efecto causado por la transmisión de las fuerzas moleculares a través del éter. “Lorentz y Poincaré tenían la dinámica relativista del electrón. Ninguno de estos autores, sin embargo, se atrevió a reformular los conceptos de espacio y tiempo. Ninguno de ellos imaginó una nueva cinemática basada en dos postulados. Ninguno de ellos derivó las transformaciones de Lorentz sobre esta base. Ninguno de ellos entendió completamente las implicaciones físicas de estas transformaciones. Todo esto fue la hazaña única de Einstein” (Darrigol, 2005:18).

Capítulo 4

Einstein y la relatividad especial. Crisis epistémica

¿Es la coordinación de relojes «realmente» una tecnología, una metafísica o una intervención física? Las tres cosas. (P. Galison, *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré. Imperios del tiempo*, 2005:342).

1.- Introducción

Durante la primera década del siglo XX Lorentz y Poincaré habían conseguido dar cuenta de los fenómenos ópticos y electromagnéticos exitosamente conservando el principio físico del éter. Sin embargo, en esa misma época, se presentó una solución diferente que resultó ser tan exitosa como radical. Esta otra solución fue presentada por Albert Einstein en 1905 y hoy en día se le conoce como relatividad especial. Dicha solución eliminaba por completo el principio físico del éter aunque retomaba elementos de Lorentz y de Poincaré. Pero la novedad más sobresaliente fue la manera en que nuestro entendimiento del espacio y del tiempo se transformó como nunca en la historia de la ciencia.

El objetivo de este capítulo es analizar la solución que Einstein propuso para las dificultades que él había identificado en la óptica y el electromagnetismo, y que presentó en un artículo titulado *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*, así como identificar cuáles eran estas dificultades, cómo las superó y las implicaciones que su solución entrañaba. Para ello reconstruyo cómo las dudas de Einstein respecto del éter, y su búsqueda por incorporar al principio de relatividad en la electrodinámica y la óptica, lo llevaron a diversas consideraciones relacionadas con la velocidad de la luz, cómo los logros previos de la práctica de medición de la velocidad de la luz le proporcionaron elementos para superar las dificultades que había encontrado y cómo la solución se presenta al reconocer la necesidad de utilizar principios físicos respecto al espacio y al tiempo definidos con base en operaciones de medición. El resultado de esta indagación fue presentado por Einstein en el mencionado artículo *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento* de 1905 y contiene una reformulación de los principios físicos al espacio y tiempo basada en la constancia de la velocidad de la luz. Aquí *el espacio y el tiempo pasaron de ser entidades sustantivas a ser una relación definida por operaciones de medición que toman a la velocidad de la luz como estándar, como un fenómeno estable que permite comparaciones objetivas entre mediciones*. Este proceso y, en particular, el reconocimiento de que las nociones clásicas de espacio y tiempo no estaban apropiadamente justificadas así como la elección de principios físicos basados en relaciones de medición, tuvo implicaciones que se pueden aclarar utilizando el concepto de *crisis epistémica* de Guillaumin (2016), que explicaré en la sección 5.

Esta reconstrucción permitirá resaltar las similitudes y diferencias entre el camino que siguieron Lorentz y Poincaré y el camino seguido por Einstein. Es decir, el capítulo permitirá

mostrar que era posible más de una solución a las dificultades que estos investigadores (principalmente Lorentz, Poincaré y Einstein) habían reconocido en la física de la época. Pero además, facilitará resaltar algunas características relevantes del pensamiento de Einstein, es decir, la reconstrucción me permitirá señalar qué conservó Einstein de la física previa, qué cambió y porqué. Esto último también permitirá reconocer la novedad de los criterios epistemológicos del pensamiento de Einstein.

2.- Los estándares para la medición de distancias y tiempos a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX

En la metrología se comenzaron a detectar problemas con el uso del metro patrón como estándar de medición desde el siglo XVIII, el cual se había definido como la longitud de una barra que se relacionaba a otras constantes astronómicas. El metro fue definido de manera que fuera conocida la proporción entre la longitud que designaba y la longitud de un cuarto de meridiano de la Tierra¹⁷. Éste debía servir de estándar para la medición de distancias. Sin embargo, algunos investigadores comenzaron a sospechar que el uso de este estándar no era del todo adecuado y que podía estar causando diversas dificultades que los científicos habían comenzado a detectar, por ejemplo: “los astrónomos encontraron que cuando usaban el valor de la velocidad de la luz como había sido calculado de los experimentos en la superficie de la Tierra en sus fórmulas, los resultados no concordaban con los cálculos previos” (Canales, 2015:107). Dichos cálculos previos se habían basado en observaciones tales como la aberración estelar¹⁸. Experimentos como los de Michelson y Morley junto con la evaluación de las hipótesis del éter eran importantes, en parte, porque se esperaba que pudieran resolver este tipo de discrepancias. Si había condiciones bajo las cuales el éter pudiera afectar la velocidad de la luz eso explicaría que las mediciones de los astrónomos sobre el valor de dicha velocidad no fuera el mismo que el valor que obtenían los experimentos en Tierra. “Michelson creó su famoso experimento Michelson-Morely... para obtener mejores estándares de medición de tiempo y longitud que tanto físicos como astrónomos pudieran usar. ¿Qué encontró Michelson en su trabajo con Morley? Nada ¿Encontró qué causaba la diferencia entre valores obtenidos por los astrónomos y los de los físicos? No” (Canales, 2015:108). A pesar del impresionante logro técnico que supuso, los experimentos de Michelson no permitieron resolver este tipo de dificultades, pero sí parecían mostrar que la velocidad de la luz era constante en el vacío.

Determinar velocidades requiere que sea posible determinar distancias y tiempos, pero mientras que se producían dudas sobre la relación entre el metro, adoptado como estándar, y otras unidades físicas, como el valor del diámetro de la Tierra, sí se ganaba confianza sobre la constancia de la velocidad de la luz, por lo que muchos propusieron usar la misma velocidad de

¹⁷ El metro debía ser 1/10, 000, 000 de la línea que une al polo con el ecuador de la Tierra (un cuarto de meridiano). Debido a que la Tierra no es una esfera perfecta dicha línea es difícil de medir.

¹⁸ Para 1881 el astrónomo Simon Newcomb había obtenido un valor 200m/s menor que el de Michelson de 1878 para la velocidad de la luz.

la luz para redefinir la longitud del metro en términos de longitudes de onda. “La idea de usar ondas de luz como estándar había sido considerada seriamente por el eminente físico James Clerk Maxwell” (Canales 2015:105) De la misma manera podía usarse la frecuencia de onda para redefinir la medición del tiempo. La medición del tiempo había pasado por dificultades similares. Originalmente los científicos determinaban el tiempo basándose en el reloj sideral. Es decir, se determinaba el tiempo mediante la posición de la Tierra con respecto a las estrellas que se asumían fijas. Los relojes mecánicos y algunas implicaciones de la termodinámica parecían sugerir que la velocidad de la Tierra estaba disminuyendo por lo que se generaron dudas sobre si era adecuado seguir usando la posición de la Tierra como estándar para medir el tiempo. La idea era que usando la luz los científicos podían obtener mejores estándares de medición para la distancia y el tiempo, más aun, el mismo fenómeno, la velocidad de la luz, podía servir para ambos. Considero que esta situación puede haber sido una motivación para adoptar una solución a los debates sobre el éter que aceptara la constancia de la velocidad de la luz.

3.- Las primeras dudas de Einstein respecto del éter

La constancia de la velocidad de la luz fue una premisa para la solución a los debates sobre el éter, que el famoso científico Albert Einstein presentó en su artículo *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento* de 1905, que se considera como el origen de lo que hoy llamamos relatividad especial. En dicha solución, Einstein daba una explicación de los fenómenos electromagnéticos y lumínicos que no requería un éter en absoluto.

Ahora, no está muy claro en qué momento Einstein comenzó a dudar sobre el éter, por un lado sabemos que a los dieciséis años, en el verano de 1895, escribió un ensayo en el que proponía una investigación experimental sobre la relación entre el éter y el magnetismo. En dicho ensayo no muestra ningún escepticismo particular respecto al éter. Por otro lado, en sus *Notas Autobiográficas*, escritas hacia 1946 y publicadas por primera vez en 1949, menciona un experimento pensado que se lo ocurrió en esta misma época (a sus dieciséis años) y que lo llevó hacia el principio de relatividad: “..., si corro detrás de un rayo de luz con la velocidad c (velocidad de la luz en el vacío), debería percibir el rayo luminoso como un campo electromagnético estacionario, aunque espacialmente oscilante. Pero semejante cosa no parece que exista, ni sobre la base de la experiencia, ni según las ecuaciones de Maxwell. De entrada se me antojó intuitivamente claro que, juzgada la situación por semejante observador, todo debería desarrollarse según las mismas leyes que para un observador que se hallara en reposo con respecto a la tierra.” (Einstein 1949/2003:56). Sin embargo, puede ser dudoso que esto implicara dudas de Einstein respecto de la existencia del éter.¹⁹

¹⁹ El recuerdo de este famoso experimento pensado resulta un poco extraño debido a que si Einstein aun creía en el éter, como muestra su ensayo de esa época, no tenía razones para concluir que un observador, como el que describe en su experimento, juzgaría todo según las mismas leyes que usaría un observador en reposo con respecto a la tierra. Además, las ecuaciones de Maxwell admiten, en principio, considerar una onda electromagnética “congelada” en reposo oscilando espacialmente. En pocas palabras, Einstein escribió un ensayo a los dieciséis años en los que muestra que creía en el éter y no tenía un escepticismo particular respecto a él, esto no parece coherente con el hecho de que,

De cualquier manera, parece claro que Einstein dudaba sobre la existencia del éter para el cambio de siglo. En una carta dirigida a Mileva Maric, escrita en agosto de 1899, Einstein comenta: “Estoy más y más convencido de que la electrodinámica de cuerpos en movimiento, como se presenta hoy, no es correcta, y que debería ser posible presentarla de una manera más simple. La introducción del término éter en las teorías de electricidad llevó a la noción de un medio de cuyo movimiento uno puede hablar, a mi parecer, sin asociar un significado físico a tal afirmación” (Einstein, 1899/1987). Y en otra carta de finales de 1901 (*Papers*, Vol.1, Doc.128.), Einstein habla de estar trabajando en un artículo sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento, por lo que podemos inferir que, para entonces, había iniciado la investigación que lo llevaría a su artículo de 1905.

4.- El camino hacia la relatividad especial

Hay que reconocer que no tenemos registros detallados sobre el camino que siguió Einstein entre estos años (1901-1905) hacia la relatividad especial, pero podemos reconstruir algunos elementos relevantes de ese proceso. Primero, Einstein inicia su artículo de 1905 mencionando lo que considera una asimetría en la electrodinámica de la época que no parecía estar en correspondencia con los fenómenos observados, esto nos da una pista para identificar la insatisfacción de Einstein con la física de la época que pudo haber motivado su trabajo. Segundo, Norton (2004) ha aportado argumentos para pensar que los primeros intentos por parte de Einstein de abordar la electrodinámica de cuerpos en movimiento consistieron en considerar que la velocidad de la luz pudiera no ser constante. Parece que sólo tras el fracaso de estos intentos Einstein consideró tomar una aproximación más radical. Tercero, en textos como *Notas Autobiográficas*, Einstein recuerda la influencia que filósofos como Erns Mach y David Hume tuvieron en sus reflexiones durante esta época. Finalmente, Galison (2005) ha llamado la atención sobre la influencia que el trabajo de Einstein en la oficina de patentes, con tecnologías relacionadas a la coordinación de relojes a distancias, pudo tener en su camino a la relatividad especial. Esta reconstrucción no necesariamente corresponderá de manera exacta con el camino seguido por Einstein debido, principalmente, a la falta de registros directos detallados. Lo esencial será tratar de identificar los criterios epistemológicos que apoyaron sus conclusiones.

4.1.- La asimetría en la electrodinámica

El artículo de 1905 en el que Einstein expone la relatividad especial comienza diciendo:

poco más de cincuenta años después, Einstein recuerda que en aquella época, a los dieciséis años, se le ocurrió un experimento pensado con el que concluía que las leyes físicas deberían ser las mismas para un observador viajando casi a velocidad de la luz que para uno en reposo. Dicha conclusión es aun más extraña debido a que, desde un punto de vista técnico, la física de la época no parecen implicar tal necesidad. Esto ha llevado a investigadores como O. Darrigol a concluir que “Hay razones para pensar que el recuerdo de Einstein fue falso o datado erróneamente... Deberíamos ver la esparcida creencia de que Einstein tenía una confianza innata en el principio de relatividad como un mito” (Darrigol, 1996:290). Sin embargo, otros como John D. Norton consideran que sí es plausible el recuerdo de Einstein, pero que no debemos verlo como un intento de demostrar la necesidad del principio de relatividad, sino como “una reacción visceral de descreencia a una posibilidad chocante, luz congelada” (Norton, 2004:77).

Se sabe que cuando la electrodinámica de Maxwell -tal como se suele entender actualmente- se aplica a cuerpos en movimiento, aparecen asimetrías que no parecen estar en correspondencia con los fenómenos observados²⁰. Pensemos, por ejemplo, en la interacción electrodinámica entre un imán y un conductor. En este caso, el fenómeno que se observa depende solamente del movimiento relativo entre el conductor y el imán, mientras que de acuerdo a la interpretación común se deben distinguir claramente dos casos muy diferentes, dependiendo de cuál de los dos cuerpos se mueva. Si se mueve el imán mientras que el conductor se encuentra en reposo, alrededor del imán aparece un campo eléctrico con cierto valor para su energía. Este campo eléctrico genera una corriente en el lugar donde se encuentre el conductor. Pero si el imán está en reposo y el conductor se mueve, alrededor del imán no aparece ningún campo eléctrico sino que en el conductor se produce una fuerza electromotriz que en sí no corresponde a ninguna energía, pero da lugar a corrientes eléctricas que coinciden en magnitud y dirección con las del primer caso, suponiendo que el movimiento relativo es igual en cada uno de los casos bajo consideración (Einstein, 1905/2005:1).



Figura 4.1- Experimento del alambre y el conductor. La explicación teórica de la época era una si se consideraba al imán en reposo y a la espira en movimiento y otra diferente si se consideraba que la espira estaba fija y el imán en movimiento.

Según Gerald Holton, dado que Einstein usa la palabra asimetría “Esta es una insatisfacción de tipo estético...” (Holton, 1969:160). Sin embargo, no todos están de acuerdo con esta interpretación por lo que es necesario tratar de aclarar a qué se refiere Einstein, en el contexto de su artículo, con el concepto de asimetría. Para hacer esto, Giora Hon y Bernard Goldstein llevaron a cabo una investigación histórica cuyos resultados publicaron en un artículo titulado *How Einstein Made Asymmetry Disappear: Symmetry and Relativity in 1905*. En dicha investigación Hon y Goldstein (2005) identifican, al menos, seis instancias de simetría en el artículo de la relatividad²¹. El uso que nos interesa es el que aparece al inicio del artículo y que parece expresar

²⁰ En el alemán original: Daß die Elektrodynamik Maxwells –wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu *Asymmetrien* führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt (énfasis mío).

²¹ De acuerdo con Hon y Goldstein, un primer sentido en el Einstein utiliza el concepto de simetría es para indicar que no hay diferencia entre un marco de referencia y otro, es decir, no hay direcciones privilegiadas, el espacio es homogéneo. Un segundo y un tercer sentido son para indicar ciertas propiedades algebraicas en las ecuaciones. El cuarto sentido se refiere a la equivalencia en las direcciones de una velocidad, es decir, que es posible sustituir v por –

la insatisfacción de Einstein con la electrodinámica de la época. Pero antes de analizar dicho uso Hon y Goldstein también señalan que los conceptos de simetría y asimetría aparecían comúnmente, y de manera explícita, en la literatura científica de finales del siglo XIX e inicios del XX con relación a los planteamientos aceptados sobre la electrodinámica, pero que es necesario reconocer las diferencias entre estos usos y el que hace Einstein. Entre los estudios que utilizan estos conceptos y que pudieron influir en Einstein se encuentran los de Heinrich Hertz y Oliver Heaviside.

Hertz explícitamente usó el término asimetría en su ensayo de 1884 cuando presenta una reconstrucción de las ecuaciones de Maxwell. En el ensayo, titulado *On the Relations Between Maxwell's Fundamental Electromagnetic Equations and the Fundamental Equations of the Opposing Electromagnetics*, Hertz afirma que “Los vectores potenciales de las corrientes eléctricas y magnéticas se han presentado hasta ahora separados, y las fuerzas eléctricas y magnéticas fueron deducidas de una manera asimétrica” (Hertz 1884/1896, 286). En la interpretación de Hon y Goldstein, lo que Hertz entiende como simetría era la posibilidad de, dado un fenómeno electromagnético, intercambiar las fuerzas eléctricas con las magnéticas para producir fenómenos análogos. “Simetría para Hertz parece encarnar la noción de intercambiabilidad, y las ecuaciones de Maxwell debían ser reconstruidas para exhibir esta característica. Entonces, en el caso de Hertz, la eliminación de la asimetría restaura la simetría en la forma matemática de las ecuaciones... Hertz busca restaurar la simetría entre fuerzas eléctricas y magnéticas” (Hon & Goldstein, 2005:496). Por su parte Oliver Heaviside, no habló explícitamente de asimetría, pero sí afirmó que a las ecuaciones de Maxwell les faltaba recuperar, de manera más completa, la correspondencia que existía entre los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos. En la lectura de Hon y Goldstein, para Heaviside, a diferencia de Hertz, la presencia de una asimetría no era un asunto puramente formal, sino práctico, es decir, recuperar la simetría en las ecuaciones era un movimiento diseñado para facilitar las aplicaciones. En pocas palabras, tanto Hertz como Heaviside, por razones diferentes, consideraban que la electrodinámica no representaba adecuadamente la correspondencia que parecía existir entre fenómenos eléctricos y fenómenos magnéticos. Los datos presentan relaciones que no están adecuadamente representadas en los modelos matemáticos. Ambos intentaron resolver esto mediante una revisión de las ecuaciones de Maxwell. Adicionalmente, Hon y Goldstein (2005) señalan esfuerzos similares por parte de otros físicos de la época como August Föppl (1854-1924), Emil Wiechert (1861-1928), Wilhelm Wien (1864-1928), etc.

Con todo, estas investigaciones, como la de Hertz y Heaviside, asumían que lo que estaba mal era la manera de derivar o presentar las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, Einstein no llevó a cabo una revisión de las ecuaciones, de hecho, las introduce en su artículo de 1905 sin

v sin alterar la descripción de la situación física. Un quinto sentido lo usa Einstein en el teorema de adición de velocidades para indicar que dos velocidades a considerar, v y w , pueden intercambiarse en la ecuación sin alterarla. El sexto es para indicar la insatisfacción que parece guiar el trabajo de Einstein; que la teoría produce dos explicaciones incompatibles para lo que parece ser el mismo fenómeno. Este sentido no cuadra con los otros usos. (Hon & Goldstein 2005:456-479).

criticarlas por lo que no parece que el pensara que hubiera un inconveniente con ellas. Cuando dice que *'la electrodinámica de Maxwell -tal como se suele entender actualmente- se aplica a cuerpos en movimiento, aparecen asimetrías que no parecen estar en correspondencia con los fenómenos observados'* parece señalar que lo inadecuado está en la manera de entender la electrodinámica y no necesariamente en los modelos matemáticos. Para Einstein, la electrodinámica de Maxwell consiste en las ecuaciones junto con una serie de principios físicos. La asimetría no está en los fenómenos, pero, dado que no revisa las expresiones matemáticas de Maxwell, parece que Einstein, a diferencia de Hertz y Heaviside, considera que dicha asimetría no es resultado de una derivación inadecuada de las ecuaciones, sino de principios físicos incorrectos. Hon & Goldstein (2005) argumentan que el concepto de asimetría es usado, al inicio del artículo de 1905, para indicar que la teoría produce dos explicaciones diferentes e incompatibles para lo que Einstein considera el mismo fenómeno, "Observemos de paso que esta sentencia no se basa en un principio estético, sino en el razonamiento físico. Y consecuentemente la solución del problema no es estética sino física... o bien el movimiento relativo produce un campo eléctrico o bien no lo produce" (Hon & Goldstein, 2005:482).

Hon & Goldstein (2005) consideran que en Einstein hay una nueva forma de establecer que algo está mal. "Nótese que el problema es nuevo. Ambas versiones del experimento llevan a la misma corriente medible (y verificable) lo que significa que las ecuaciones subyacentes son correctas. Pero el hecho de que en un caso la teoría demanda que aquí haya un campo eléctrico, y en el otro caso no (lo que parece ser una contradicción básica), indica que hay algo mal en la teoría aparte de las ecuaciones. Incluso después de darse cuenta de que algo está mal con la teoría usualmente no hay un camino directo para saber qué está mal y cómo arreglarlo." (Hon & Goldstein 2005:486-487). En pocas palabras, los físicos de la época usaban comúnmente los términos simetría y asimetría en relación al campo eléctrico y magnético, pero no en la manera que lo hace Einstein. Son los datos de las investigaciones empíricas los que muestran como se relacionan los fenómenos, pero las expresiones matemáticas no capturan adecuadamente la relación entre la electricidad y el magnetismo, a esto se refieren como asimetría. La simetría o asimetría puede ser física o matemática, Hertz y sus contemporáneos pensaban que la asimetría que identificaban podía eliminarse revisando la matemática, pero Einstein se da cuenta que es la interpretación física, es decir, los principios físicos lo que debe ser ajustado. Einstein elimina la asimetría en la electrodinámica con su artículo de 1905, para ello plantea el problema de una forma distinta, asume que las ecuaciones de la electrodinámica son correctas e identifica la asimetría como consecuencia de interpretaciones físicas erróneas y no de la forma de las ecuaciones. Sin embargo, Einstein aun necesitó establecer qué elementos o supuestos son los que sí necesitaban ser revisados para eliminar la insatisfacción que había identificado.

4.2.- La constancia de la velocidad de la luz

Como se ha dicho, en el experimento del imán y el conductor la electrodinámica de inicios del siglo XX distinguía dos casos, uno es cuando el imán está en reposo y el conductor en movimiento y otro cuando el conductor está en reposo y el imán en movimiento, mientras que la

corriente medible sólo dependía de la velocidad relativa. La distinción se debe a que se considera un éter respecto al cual hay movimiento absoluto, si tal éter existe no es posible dar una explicación de los fenómenos electromagnéticos en términos de movimiento relativo únicamente, aunque el único dato que relaciona los fenómenos, en este caso, es, justamente, el movimiento relativo. En otras palabras, los ejemplos como el del experimento en cuestión le indicaron a Einstein que los datos empíricos de la electrodinámica se relacionaban conforme al principio de relatividad. Sin embargo, para capturar esta relación en los principios físicos hay que prescindir del éter, puesto que si hay un éter es necesario explicar también los efectos del movimiento con respecto al mismo y no sólo el movimiento relativo entre los fenómenos. Pero introducir el principio de relatividad tiene como consecuencia que, si no hay un éter en relación al cual juzgar si algo, por ejemplo el imán, está en reposo, entonces un observador en un marco de referencia cuyo movimiento sea nulo respecto al imán juzgará que sólo se genera un campo magnético, pero un observador en un marco de referencia que sí tenga movimiento no nulo respecto del imán deberá concluir que hay tanto un campo magnético como un campo eléctrico. Es decir, introducir el principio de relatividad y eliminar el éter tiene como consecuencia que ya no podemos considerar que los fenómenos puedan presentar un campo eléctrico o un campo magnético, sino que hay un único campo electromagnético cuyos efectos, eléctricos o magnéticos, dependen del marco de referencia. Con todo, esto requiere que las ecuaciones, para pasar de la representación en un marco de referencia a otro, tomen esto en consideración al tratar con fenómenos electromagnéticos. Es decir, se requiere leyes de transformación de campos adecuadas. En pocas palabras, Einstein necesitaba encontrar ecuaciones para pasar de un marco de referencia a otro que permitieran introducir el principio de relatividad y prescindieran del éter. De acuerdo con Norton (2004), es poco probable que Einstein utilizara las transformaciones de Lorentz al inicio de su investigación (alrededor de 1901) debido a que parece haber evidencia de que él primero consideró una teoría de emisión. Es decir, consideró suponer que la velocidad de la luz no es constante, sino que depende de la velocidad de la fuente que la emite.

Dado que la relativización de la simultaneidad parece provenir de la última etapa de la investigación de Einstein, el camino más natural para tratar de incorporar el principio de relatividad a la electrodinámica y eliminar el éter sería utilizar las transformaciones de la mecánica clásica, las transformaciones galileanas. Estas transformaciones, para el tiempo y la distancia son:

$$t = t'; \quad x = x' - vt' \quad (4.1)$$

Ahora, las leyes de Maxwell en el vacío, en unidades gaussianas, son:

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \times H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4.4)$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.5)$$

Dónde E representa el campo eléctrico, H el campo magnético, j el flujo de corriente eléctrica y ρ la densidad de carga. Al aplicar las transformaciones (1) podemos obtener o bien:

$$E = E'; H = H' - \frac{1}{c}(v \times E') \quad (4.6)$$

O bien:

$$E = E' + \frac{1}{c}(v \times H'); H = H' \quad (4.7)$$

Donde E representa el campo eléctrico, H el campo magnético, v la velocidad de un marco de referencia con respecto al otro mientras que E' y H' representan los valores en el nuevo marco de referencia. Para dar cuenta de un experimento como el del imán y el conductor (que requiere utilizar las ecuaciones 3 y 5) basta utilizar las transformaciones (7). Sin embargo, la dificultad que se presenta consiste en que las ecuaciones de Maxwell (2) y (4) no mantienen su forma bajo estas transformaciones. Para hacerlas covariantes (que no se alteren al cambiar de marcos de referencia) deberíamos utilizar las transformaciones (6), pero entonces ya no podríamos dar cuenta del experimento del experimento del imán y el conductor. En otras palabras, hay dos maneras de utilizar las transformaciones galileanas (1) para obtener transformaciones de campo covariantes; una es usar (6), pero sólo funciona para las ecuaciones (2) y (4), la otra opción es usar (7), pero entonces sólo funciona para (3) y (5). Es decir, las transformaciones galileanas no nos permiten obtener transformaciones de campo que funcionen para las cuatro ecuaciones de Maxwell. Podemos encontrar transformaciones para dos de ellas, pero entonces no funcionarán para las otras dos. Norton (2004) considera que es posible que Einstein primero intentara buscar transformaciones de campo basadas en transformaciones galileanas, pero que se diera cuenta de que esto sólo es posible si se divide la teoría en dos. Esta dificultad se presenta porque al unir las dos partes de la electrodinámica la constancia de la velocidad de la luz se puede derivar por lo que una única formulación galileo-covariante no es posible. “Una manera de proceder es intentar modificar la teoría de Maxwell de alguna manera para hacerla galileo-covariante bajo una única ley de transformación. Es obvio que una electrodinámica galileo-covariante debe ser una teoría de emisión de luz, esto es, una teoría en la que la velocidad del emisor se suma vectorialmente a la velocidad de la luz emitida” (Norton 2004:57).

No tenemos registro sobre esta etapa de la investigación de Einstein, pero sabemos que el físico Walter Ritz (1878-1909) publicó una teoría de este tipo en 1908 y que Einstein reconoce en una carta de 1912 que hizo consideraciones similares antes de llegar a la relatividad. Sin embargo, en la misma carta, Einstein menciona que “Sabía bien que el principio de la constancia de la velocidad de la luz es completamente independiente del postulado de relatividad, y consideré qué es más probable; el principio de constancia de c como lo demandan las ecuaciones de Maxwell, o la constancia de c exclusivamente para un observador colocado en la fuente de la

luz. Me decidí por lo primero porque estaba convencido de que toda la luz está definida únicamente por la frecuencia y la intensidad” (Einstein 1912, Papers, Vol.5, Doc.409). El punto parece ser que, para Einstein, la luz debe caracterizarse sólo por su frecuencia y por su intensidad, mientras que considerar que la velocidad de la luz depende de la velocidad de su fuente implicaría que la luz presentaría características que serían consecuencia de esta dependencia en su velocidad, pero este no es caso para ninguna de las cualidades conocidas de la luz. Parece que a Einstein incluso le preocupaba que no pudiera haber una manera de encontrar transformaciones, basadas en ecuaciones diferenciales, para una propuesta de emisión. “La preocupación recurrente de Einstein con una teoría de emisión es que no parece haber manera de formularla en una teoría de campo basada en ecuaciones diferenciales. Una razón que da para esto es que una teoría de emisión permite ondas de diferentes velocidades. Una onda de luz de velocidad $c+v$ puede reflejarse como $c-v$. Luz de una fuente acelerada puede rebasar e incluso formar puntos singulares.” Sin embargo, “Este argumento de muchas velocidades simplemente no es convincente. Toma poco esfuerzo encontrar ecuaciones diferenciales que admitan este comportamiento para ondas. Hoy en día nos son familiares por la teoría cuántica, por ejemplo.” (Norton 2004:74). Es posible que Einstein abandonara la búsqueda de una teoría de emisión debido, más bien, a su experimento pensado (comentado en la sección 3) sobre cómo se vería la física si alcanzáramos un rayo de luz. Lo que probablemente dicho experimento expresa es la insatisfacción que la idea de luz de diferentes velocidades le causaba a Einstein. Además, no hay manera de tener transformaciones de campo galileo covariantes para una teoría de emisión en la que la luz sólo sea caracterizada por su intensidad, color y polarización. “Para nuestros propósitos lo que más importa es que estas exploraciones, cómo sea que hayan procedido, requirieron años de esfuerzo y llevaron a Einstein a una creciente frustración y a una disposición para considerar una solución radical”. (Norton, 2010:366).

4.3- La aberración estelar y el experimento de Fizeau

Durante 1962, R. S. Shankland publicó sus conversaciones con Einstein, las cuales tuvieron lugar en cinco entrevistas entre 1950 y 1954. En dicha publicación reporta que Einstein “continuó diciendo que los resultados experimentales que más lo habían influenciado fueron las observaciones de la aberración estelar y las mediciones de Fizeau sobre la velocidad de la luz en agua en movimiento. ‘Fueron suficientes’ dijo.” (Shankland, 1962:48). Sin embargo, no dice con claridad la manera exacta en que estos resultados influyeron su camino hacia la relatividad. La explicación de Norton (2004) a esta cuestión considera la electrodinámica de Lorentz. Einstein ya había decidido que el principio de relatividad debía funcionar para el experimento del imán y el conductor, si luego comenzó a considerar la electrodinámica de Lorentz (probablemente la de 1895), entonces debe haber notado que era posible dar una explicación del experimento con transformaciones de campo que permitieran conservar el principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz si se utiliza las transformaciones de Lorentz en vez de las galileanas. Dichas transformaciones (como se explica en el capítulo anterior) implican la noción de tiempo local. En 1907 Einstein comentó que todo lo que se necesitaba para llegar a la relatividad especial

era considerar al ‘tiempo local de Lorentz’ no como un mero artificio para facilitar los cálculos, sino considerarlo simplemente como ‘tiempo’, el ‘tiempo real’. Aquí es dónde la aberración estelar y el experimento de Fizeau pudieron jugar su papel central en las reflexiones de Einstein. Lo que propone Norton (2004) es que uno puede llegar a las transformaciones de Lorentz, y en particular a la transformación del tiempo local, a partir de analizar la aberración estelar y el experimento de Fizeau. Es decir, a partir de estos experimentos se puede obtener la transformación para el tiempo local independientemente de la electrodinámica y sin recurrir al teorema de estados correspondientes de Lorentz. Einstein probablemente vio en esto un apoyo empírico, independiente de la electrodinámica, para el tiempo local.

El tiempo local se obtiene de la aberración estelar y el experimento de Fizeau de la siguiente forma²²: Para la aberración estelar considérese la luz emitida por una estrella en reposo cuya forma de onda es representada por $f(\omega t - ky)$ donde ω sería la frecuencia, t el tiempo, k el vector número de onda y f la intensidad de campo. Lorentz había concluido que la forma de onda para luz emitida por una estrella moviéndose a velocidad v perpendicularmente a la dirección de emisión sería $f(\omega t - kvx/c - ky)$. El principio de relatividad requiere que este caso sea idéntico al que juzgaría un observador moviéndose a velocidad v en dirección opuesta y considerando la estrella en reposo. Uno recobra la transformación entre los dos marcos de referencia revirtiendo los cálculos de Lorentz:

$$f\left(\omega t - \frac{kvx}{c} - ky\right) = f\left(\omega\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) - ky\right) = f(\omega t' - ky') \quad (4.8)$$

Identificando los dos argumentos tenemos:

$$\omega\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) - ky = \omega t' - ky' \quad (4.9)$$

De aquí, podemos extraer la transformación parcial

$$t' = \left(t - \frac{vx}{c^2}\right), \quad y' = y \quad (4.10)$$

En otras palabras, la desviación característica de la aberración estelar se puede ver entonces como evidencia empírica directa de que debe haber un tiempo local en las transformaciones y se obtiene mediante consideraciones independientes de la electrodinámica. Lo mismo sucede para el experimento de Fizeau. Un observador moviéndose con el agua con índice de refracción n ve $f(\omega t' - kx')$. Considerando $c/n = \omega/k$, un observador moviéndose a $-v$ en dirección x verá:

$$f\left(\omega\left(1 + \frac{vn}{c}\right)t - k\left(1 + \frac{v}{cn}\right)x\right) = f(\omega t' - kx') \quad (4.11)$$

Nuevamente recobramos las transformaciones identificando los argumentos

²² A continuación sigo la exposición de Norton 2004:82-93

$$wt' - kx' = w\left(1 + \frac{vn}{c}\right)t - k\left(1 + \frac{v}{cn}\right)x = w\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) - k(x - vt) \quad (4.12)$$

A partir de aquí sacamos las transformaciones:

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}, \quad x' = x - vt \quad (4.13)$$

Resumiendo, hasta aquí, sabemos que Einstein consideró inicialmente que la velocidad de la luz podría no ser constante, pero que posteriormente rechazó estas teorías de emisión y aceptó la constancia de la velocidad de la luz. Adicionalmente, los experimentos de Fizeau y las observaciones de la aberración estelar posiblemente le mostraron que los fenómenos ópticos implicaban al tiempo local de Lorentz por consideraciones independientes del teorema de estados correspondientes. Sin embargo, “Todo esto pudo pasar como un asunto de manipular ecuaciones formalmente sin reconocer el resultado físico de la relatividad de la simultaneidad. Pero una vez que la forma de las ecuaciones era segura, su interpretación física sería un problema apremiante de manera que la relatividad de la simultaneidad no podía estar lejos” (Norton 2004:90)

4.4-Influencia de Mach y Hume

A pesar de que Einstein trabajó en la relatividad por al menos siete años, el aspecto realmente revolucionario, la relativización de la simultaneidad, entró sólo en la fase final. En una conferencia de 1922 Einstein afirmó que:

Pasé más de un año en vano tratando de modificar la idea de Lorentz con la esperanza de resolver este problema. Por suerte un amigo mío en Berna (Michele Besso) me ayudó... Discutimos cada aspecto de este problema. Entonces, repentinamente, entendí dónde estaba la clave. Al día siguiente regresé con él de nuevo y le dije, sin siquiera decir ‘hola’, ‘gracias. He resultado completamente el problema’. Un análisis del concepto de tiempo fue mi solución. El tiempo no puede definirse absolutamente, y hay una relación inseparable entre el tiempo y la velocidad de una señal. Con este nuevo concepto, pude resolver todas las dificultades por primera vez. En cinco semanas la teoría especial de la relatividad estaba completa (Einstein 1922/1982:46).

Ahora, para intentar entender en qué consistió este análisis del concepto de tiempo podemos recordar sus comentarios en las *Notas Autobiográficas* donde señala: “En mi caso, el pensamiento crítico que hacía falta para descubrir este punto central lo fomentó especial y decisivamente la lectura de los escritos filosóficos de David Hume y Ernst Mach.” (Einstein, 1949/2003:57). Sin embargo, parece que, aunque Hume y Mach analizan muchos aspectos del espacio y tiempo, lo que realmente influyó en Einstein, en este caso, es el análisis que estos autores hacían respecto de los conceptos en general. Einstein retoma de ellos la idea de que formulamos conceptos de una manera u otra dependiendo de las sensaciones que tenemos de aquello que los conceptos designan, por lo que no pueden considerarse representaciones adecuadas de la realidad cuando tratamos con dominios que están más allá de nuestra experiencia sensible. Por ejemplo, para Hume el concepto de tiempo resulta de nuestras experiencias cambiantes por lo que dicho

concepto no aplicaría a objetos que no cambien.²³ Einstein no retoma propiamente esta concepción del tiempo, pero sí la idea de que el concepto que tenemos de tiempo depende de nuestras experiencias sensibles y que podría operar de manera diferente en ámbitos distintos al de nuestra experiencia directa.

Respecto a Mach, la lectura que hace Einstein de éste podemos reconstruirla a partir de un obituario que éste escribió en 1916. En dicho documento, Einstein resalta la idea de Mach de basar el significado de los conceptos en la experiencia y, sobre todo, la idea de que ciertos conceptos pueden llegar a ser tomados como inmutables o necesarios a priori y cómo esto puede obstaculizar a la ciencia. En la lectura de Einstein, Mach hace una aproximación histórico-crítica de los conceptos científicos para dar cuenta de su origen y desarrollo. Con todo, la postura de Einstein, es menos radical que la de Mach puesto que no estaba propiamente en contra de usar conceptos arbitrarios siempre que esto se hiciera de manera consciente y sin considerar a tales conceptos como dados o necesarios. En este sentido, la concepción propia de Einstein es más cercana a la de Hume. La diferencia con Mach radica en que Hume no pugna por eliminar conceptos que no sean deducidos de la experiencia, sino que basta con reconocer su origen.

Parece que, con base en sus lecturas de Mach y Hume, Einstein se dio cuenta de que el concepto de simultaneidad absoluta no estaba apropiadamente basado en la experiencia por lo que no necesariamente representaba una realidad física. En nuestra experiencia diaria no consideramos el tiempo de propagación de la luz, pero al tratar con fenómenos en los que tal velocidad es importante asumimos que el concepto de simultaneidad, en relación a eventos distantes, debe aplicarse de la misma manera. Sin embargo, aquí hay una presuposición a priori. “En este punto, alguien que siga a Mach pediría purgar el concepto de la teoría como metafísico sin base en la experiencia. Einstein, sin embargo, estaba dispuesto a retener conceptos siempre que su carácter arbitrario fuera reconocido y de manera que ya no permitiera la introducción involuntaria de presuposiciones a priori. En el caso de la simultaneidad distante, Einstein logró esto introduciendo una definición—una estipulación libremente escogida— cuidadosamente diseñada para minimizar el peligro de introducir falsas presuposiciones físicas” (Norton, 2010, 371).

4.5- Coordinación de relojes distantes y solución

En su artículo de 1905 *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*, Einstein comenta que las dificultades experimentales para constatar el movimiento de la Tierra “permiten suponer que no solamente en mecánica sino también en electrodinámica ninguna de las propiedades de los fenómenos corresponde al concepto de reposo absoluto.” (Einstein 1905:891). Dado lo cual, anuncia que tomará como hipótesis que para todos los marcos de referencia inerciales las mismas leyes electrodinámicas y ópticas tienen validez. Adicionalmente, propone tomar como segunda hipótesis que la velocidad de la luz en el vacío es constante y que no depende de la velocidad del

²³ De acuerdo con Norton (2010:375), el texto de Hume que Einstein probablemente conoció fue el “Tratado de la naturaleza humana” puesto que estaba disponible y era discutido en el entorno social de Einstein antes de la relatividad.

emisor. También comenta que la contradicción entre ambas hipótesis sólo es aparente. Como hemos visto, estas dos hipótesis son las que han guiado la investigación de Einstein. Él apoya su primera hipótesis, el principio de relatividad, señalando que los experimentos diseñados para detectar el movimiento de la Tierra a través del éter no han encontrado efectos de tal desplazamiento. Adicionalmente, más adelante en el artículo, él mostrará que el principio de relatividad elimina la asimetría de la electrodinámica. La segunda hipótesis, la de la constancia de la velocidad de la luz, es el resultado de sus esfuerzos infructuosos por dar con una teoría de emisión que incorpore el principio de relatividad. Tanto el fracaso de las teorías de emisión como los datos de la aberración estelar y del experimento de Fizeau proveen una base sólida para esta segunda hipótesis. Sin embargo, la conjunción de estos supuestos parece implicar una dificultad puesto que pareciera inconsistente decir que las leyes de la física son las mismas para todos los marcos de referencia y que la velocidad de la luz es constante independientemente de la velocidad de emisión. Si las leyes de la física, en particular de la óptica, son las mismas para todos los marcos de referencia inerciales ¿cómo podrían dos observadores en movimiento, uno con respecto al otro, medir el mismo valor para la velocidad de la luz? Es decir, si, por ejemplo, camino en una dirección y veo un auto moverse en la misma dirección, el movimiento del auto será más lento juzgado por mí que por una persona quieta a mitad de la calle. Sin embargo, los dos postulados de Einstein implican que se mide la misma velocidad de la luz independientemente de cómo se muevan los observadores. Esta es una manera diferente de plantear la dificultad descrita en los capítulos 1 y 2. En las investigaciones experimentales no parecía que hubiera variaciones en la velocidad de la luz, por lo que los datos apoyan los postulados de Einstein, el de relatividad y el de la constancia de la velocidad de la luz. Esto no evita que las conclusiones parezcan contradictorias. “Naturalmente, hoy nadie ignora que todos los intentos de aclarar satisfactoriamente esa paradoja estaban condenados al fracaso mientras el axioma del carácter absoluto del tiempo, o de la simultaneidad, siguiera anclado inadvertidamente en el inconsciente.” (Einstein 1949/2003:57). La dificultad puede evitarse si consideramos que la distancia y el tiempo cambian de tal manera que, sin importar la velocidad inercial de un observador, éste siempre mida el mismo valor para la velocidad de la luz. Esto, a su vez, tendría como consecuencia que dos eventos podrían ser simultáneos para un observador, pero no para otro debido a los cambios en el tiempo que cada uno mide. “Debemos tener en cuenta que todas nuestras afirmaciones en las cuales el tiempo juega algún papel, siempre son afirmaciones sobre eventos simultáneos. Por ejemplo, cuando digo ‘Ese tren llega aquí a las 7’, esto significa algo así como: ‘El momento en que la manecilla pequeña de mi reloj marca las 7 y la llegada del tren son eventos simultáneos’.” (Einstein 1905/2005:2). Para poder hacer esto de manera consistente es necesario establecer la relación entre el tiempo que miden diferentes observadores en diferentes marcos de referencia. En otras palabras, necesitamos establecer la relación o coordinación entre relojes distantes.

En este punto conviene mencionar la investigación de Peter Galison (2005) en la que se resaltan las dificultades tecnológicas que la coordinación de relojes distantes representó para el siglo XIX y que seguían siendo un reto a inicios del siglo XX. Galison (2005) señala que el

trabajo de diversos científicos de estas épocas estaba enfocado en superar obstáculos tecnológicos que implicaba la coordinación de relojes distantes. Menciona principalmente a H. Poincaré, pero podemos agregar a Arago, Fizeau y Heaviside como otros científicos cuyos trabajos se relacionaron al mejoramiento de dichas tecnologías. El propio Einstein no era ajeno a tales desarrollos. “El conocimiento de Einstein sobre aparatos electromagnéticos procedía en parte del negocio de la familia. Su padre Hermann y su tío Jakob Einstein habían construido su empresa a partir de las patentes de Jakob sobre aparatos de relojería eléctrica sensibles para medir sistemas eléctricos” (Galison 2005:279). Además, durante los años que abordó el tema de la electrodinámica de cuerpos en movimiento, Albert Einstein trabajó en una oficina de patentes en la cual revisó diversas propuestas relacionadas a la coordinación de relojes distantes por medios electromagnéticos. “Una posibilidad es la siguiente: sensibilizado frente a la importancia de conceptos basados en procedimientos, la coordinación del tiempo y sus solicitudes de patentes, así como sus discusiones filosófico-criticas en la Academia Olympia, Einstein podía haber estado plenamente preparado para adoptar y transformar cualquier mención de coordinación de relojes en el contexto de la electrodinámica de cuerpos en movimiento” (Galison, 2005:285-286).

En otras palabras, Einstein necesitaba hacer una revisión del concepto de tiempo que estableciera una relación apropiada entre el tiempo medido en marcos de referencia distintos. De manera que plantea una coordinación de relojes similar a la que había propuesto Poincaré para interpretar el tiempo local de Lorentz. Primero, Einstein considera dos puntos A y B cada uno con un reloj que define el tiempo en su posición:

Sin embargo, sin especificaciones adicionales no es posible comparar cronológicamente el evento en A con el evento en B; hasta ahora hemos definido un ‘tiempo A’ y un ‘tiempo B’, pero no un ‘tiempo’ común para A y B. Este último tiempo se puede definir estableciendo por definición que el ‘tiempo’ que necesite la luz para viajar de A a B sea igual al tiempo para pasar de B a A. Supongamos que una señal de luz parte de A hacia B en el ‘tiempo A’ t_A , llega a B y se refleja de regreso hacia A en el ‘tiempo B’ t_B y finalmente arriba al punto A en el ‘tiempo A’ t'_A . De acuerdo a la definición, los dos relojes estarían sincronizados si: $t_B - t_A = t'_A - t_B$. (Einstein 1905/2005:3).

Adicionalmente, Einstein señala que esto, junto que el hecho de que la velocidad de la luz es constante para todos los marcos de referencia inerciales, implica que aunque dos observadores tengan sus relojes sincronizados en un marco de referencia no necesariamente estarán sincronizados en otro marco, por lo que no podemos asignar un significado absoluto al concepto de simultaneidad. Posteriormente, Einstein utiliza su principio de relatividad y el de constancia de la velocidad de la luz junto con su redefinición de la simultaneidad para derivar las transformaciones de Lorentz. Una vez hecho esto, Einstein señala que, como consecuencia de dichas transformaciones, el espacio y el tiempo pueden contraerse al cambiar de un marco de referencia a otro por un factor que depende de la velocidad relativa entre ambos y da la ley relativista para la composición de velocidades. Con esto, Einstein termina la parte cinemática de su artículo y deduce las consecuencias para la electrodinámica. Al hacerlo muestra que las ecuaciones de Maxwell se mantienen igual para todos los marcos de referencia “Además es claro

que ahora deja de existir la asimetría mencionada en la introducción que aparecía cuando considerábamos corrientes producidas por el movimiento relativo de un imán y un conductor.” (Einstein 1905/2005:19). Eso se debe a que ahora la fuerza actuando en una unidad puntual de carga en movimiento, a un determinado tiempo, debe ser vista ahora como el campo eléctrico actuando en ella en un marco inercial que tiene la misma velocidad que la carga en ese instante. Finalmente, Einstein usa sus transformaciones para obtener el efecto de aberración estelar, el efecto Doppler, la ecuación para el movimiento del electrón y muestra la conformidad con la electrodinámica de Lorentz lo que implica que podía rescatar los resultados de Lorentz en cada experimento sobre óptica y electrodinámica como en el caso del experimento de Fizeau.

Lo que Einstein ha construido en este artículo de 1905 es una explicación que da cuenta de los mismos experimentos y observaciones que podían explicar Lorentz y Poincaré sin necesidad de especular sobre un éter, introduciendo, además, el principio de relatividad de manera que elimina la asimetría que él y otros investigadores habían identificado en la electrodinámica. Además, al considerar constante a la velocidad de la luz, sin importar el marco de referencia, permite utilizarla como punto fijo para definir estándares de medición objetivos de espacio y tiempo.

5.- Crisis epistémica

Como hemos visto, lo que le ha dado la clave a Einstein para resolver las dificultades que había identificado es reformular los principios físicos de espacio y tiempo, éstos, ahora, ya no son elementos sustantivos de la comprensión del mundo físico, sino que son relaciones definidas mediante operaciones de medición. John Dewey consideraba que tales nociones de espacio y tiempo de Einstein: “...hacen el trabajo que todos los pensamientos y objetos del pensar tienen que efectuar: conectan, a través de operaciones relevantes, las discontinuidades de observaciones y experiencias individuales en continuidad unas con otras. Su validación es un asunto de su eficacia para realizar esta función;” (Dewey 1929:146).

Einstein ha cambiado la manera de definir principios físicos y esto ha dado como resultado que las categorías y distinciones previas ya no sean adecuadas, como podemos ver en el caso de la electrodinámica. La reformulación del espacio y tiempo ha tenido como consecuencia que la distinción entre campo magnético y campo eléctrico, en el caso de cuerpos en movimiento, ya no tiene un significado, ahora hay un único campo electromagnético cuyos efectos dependen del marco de referencia. La distinción es un artificio del formalismo que desaparece al aplicar el principio de relatividad. Con esto, Einstein obtiene un planteamiento con categorías cualitativamente distintas a las anteriores y que permite relacionar adecuadamente datos de la electrodinámica, la mecánica, la óptica y la metrología. Lorentz y Poincaré distinguen el espacio y el tiempo reales del espacio y el tiempo que se mide, esto no sólo complica el usar a la velocidad de la luz para redefinir los estándares de medición, sino que impide conectar datos de manera satisfactoria. Como reconocen Hon y Goldstein (2005), Einstein no describe al principio de relatividad o a sus conclusiones como ‘simétricas’, sólo dice que la asimetría se ha eliminado.

Para Hertz remover la asimetría significaba modificar las ecuaciones para hacer intercambiables a las fuerzas eléctricas y magnéticas, pero siguen siendo cosas diferentes. Para Einstein lo inadecuado es la distinción entre electricidad y magnetismo cuando ambas son manifestaciones de una misma cosa. Las categorías son diferentes de manera que las viejas distinciones y sus descripciones pierden vigencia. En pocas palabras, para Hon y Goldstein (2005) Hertz busca rescatar una simetría ente la electricidad y el magnetismo, mientras que para Einstein ambos son manifestaciones de un único campo electromagnético, esto elimina la asimetría porque ya no hay dos entidades que puedan ser simétricas o asimétricas, sólo hay una cuyos efectos pueden cambiar al cambiar el marco de referencia.

En este punto, podemos apreciar más claramente lo que ha sucedido utilizando el concepto de crisis epistémica de Guillaumin (2016). Cuando consideramos la relación entre *datos*, *principios físicos* y *modelos matemáticos*, también es necesario reconocer que cada uno de estos componentes tiene una fuente de justificación propia. Para representar esto, Guillaumin (2016) utiliza el esquema de integración cognitiva que se muestra en la figura 4.2. Dicho esquema muestra relaciones (representadas por flechas) de ida y vuelta entre cada una de las categorías de análisis, así como entre cada una de éstas y sus respectivas fuentes de justificación. Así, es posible distinguir dos tipos de modificaciones en la práctica científica: unas son llamadas *cambios* y las otras *crisis*. Los *cambios* consisten en remplazos de uno, o más, de los elementos que constituyen a los principios físicos, los modelos matemáticos y los datos. Por su parte, las *crisis* consisten en el remplazo de uno, o más, de los elementos de justificación correspondientes a los tres componentes de la práctica científica (representados por elipses en el esquema de la imagen 4.2). Debido a que hay tres fuentes de justificación, una para cada componente del esquema, hay tres tipos diferentes de crisis; *crisis metodológica*, *crisis epistémica* y *crisis cognitiva*. Si se remplazan elementos de justificación de datos, es decir, de las reglas de obtención o procesamiento de datos, entonces la modificación ha generado una *crisis metodológica*. Si lo que se modifica son criterios de evidencia para establecer principios físicos entonces se ha producido una *crisis epistémica*. Finalmente, si lo que se modifica es algún fundamento matemático de los modelos geométricos, entonces se ha producido una *crisis cognitiva*²⁴.

²⁴ Para una mayor clarificación del uso de estos conceptos véase Guillaumin (2016:86-94).

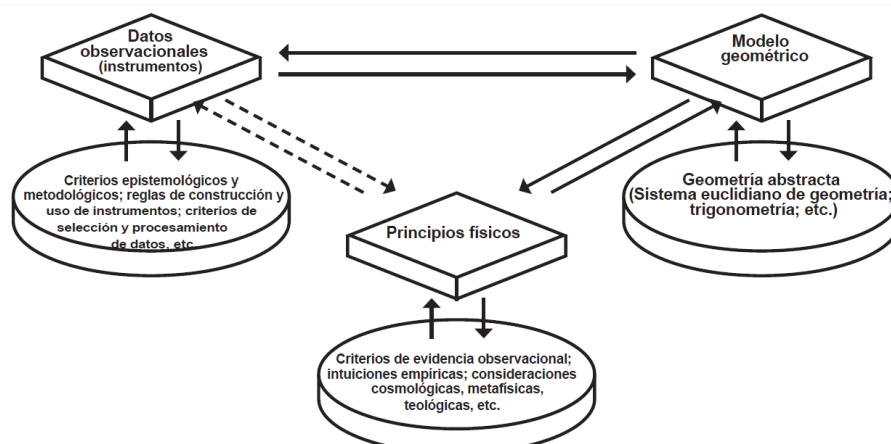


Figura 4.2- Esquema de integración cognitiva en tres dimensiones. Se distinguen tres componentes de las prácticas científicas de medición (rombos) cada uno con su propia fuente de justificación (elipses). (Agradezco al Dr. Godfrey Guillaumin el haberme facilitado esta figura de su esquema de integración cognitiva. Puede encontrarse también en Guillaum 2016:85.)

Considero que Einstein ha llevado a cabo, en 1905, una *crisis epistémica*. Las diferencias entre la aproximación de Einstein y la de Lorentz-Poincaré, del capítulo anterior, van más allá de reconocer la asimetría en la electrodinámica. Uno puede preguntar, por ejemplo, por qué Einstein ve aquí un motivo para llevar a cabo una revisión mientras que Lorentz y Poincaré no. Ambas propuestas, la de Einstein y la de Lorentz-Poincaré, dan cuenta de los fenómenos y experimentos que hemos revisado en los capítulos anteriores y lo hacen de manera consistente, es decir, *ambos mantienen los mismos datos*. En otras palabras, considero que podemos resaltar dos preguntas filosóficamente importantes; primero, en términos epistemológicos ¿qué hace diferente a las conclusiones de Einstein de las de Lorentz y Poincaré? Y, segundo, ¿hay algún sentido en que una de estas aproximaciones, la de Einstein o la de Lorentz-Poincaré, pueda considerarse preferible a la otra? Algunos historiadores consideran que se puede responder a estas preguntas señalando el supuesto carácter *ad hoc* de las hipótesis de Lorentz-Poincaré. Sin embargo, esta forma de reconstruir la diferencia entre ambas propuestas ha presentado muchas dificultades por lo que no me parece una manera adecuada de entender el caso en cuestión²⁵. Lo que busco

²⁵ Entre los historiadores que han considerado *ad hoc* a las hipótesis de Lorentz, en particular a la de contracción, se encuentra Gerald Holton quien ha dicho que "... la hipótesis de contracción cuando fue hecha era clara y descaradamente *ad hoc*" (Holton 1969:179). Para apoyar esta afirmación, Holton aporta citas que parecen sugerir que los científicos de inicios del siglo XX percibían a la hipótesis de contracción como artificial. Sin embargo, no todos han estado de acuerdo con esta evaluación. Everitt (1980), por ejemplo, señala que: "Los textos de física suelen referirse a la contracción FitzGerald-Lorentz como una suposición *ad hoc* soñada para salvar las apariencias. No lo era. La fuerza entre dos cargas eléctricas es una función de su movimiento con respecto a un marco de referencia común: Maxwell lo había mostrado (de manera incompleta y en otro contexto) en el *Treatise*. Por lo tanto, como FitzGerald afirmó, todo lo que uno necesita asumir para explicar el resultado negativo del experimento Michelson-Morley es que las fuerzas intermoleculares obedecen las mismas leyes que las fuerzas electromagnéticas." (Everitt, 1980:215). La pregunta, entonces, sería si dicho argumento es suficiente para no considerar a la hipótesis como *ad hoc*. Parte de la dificultad para responder a esta cuestión es que hace falta establecer con claridad un criterio para concluir

proponer es que la diferencia se debe a que Einstein utiliza criterios epistemológicos distintos a los de Lorentz y Poincaré, es decir, Einstein ha producido una *crisis epistémica*. Esto hace relevante analizar los criterios que pudieron haber guiado a estos investigadores.

Para identificar los criterios epistémicos (elementos de justificación de principios físicos) de Lorentz y Poincaré, podemos señalar que Lorentz no hace un análisis detallado del concepto de tiempo, incluso a pesar de que introduce el concepto de tiempo local. Para Lorentz, el tiempo local es un recurso que facilita los cálculos, pero sin realidad física por lo que, al parecer, Lorentz considera que las concepciones clásicas del espacio y del tiempo estaban justificadas y no requerían ser revisadas. Ahora, también hay que considerar los criterios que pudieron haber guiado a Poincaré. Del capítulo anterior podemos recordar que un criterio epistemológico explícito, para Poincaré, es la manera en que las propuestas teóricas mantienen principios generales exitosos. Principios que, aunque eran de origen empírico, actuaban como convenciones o definiciones debido a la utilidad que habían mostrado para dar cuenta de una gran variedad de fenómenos. En el caso del éter “Si el éter existe o no importa poco, dejemos eso a los metafísicos; lo que es esencial para nosotros es que todo pasa como si existiera y que esta hipótesis parece adecuada para explicar los fenómenos” (Poincaré, 1905:235). Además, el carácter clásico del espacio y el tiempo ha sido adecuado en todas las instancias de la física en la que se ha usado por lo que cumplen los requisitos para ser adoptados como convención.

si una hipótesis es o no ad hoc. A este respecto, Christopher Hunt (2012) hace un análisis de los criterios que se han propuesto, en filosofía de la ciencia, para identificar qué hipótesis deben considerarse *ad hoc*. Su conclusión es que dichas propuestas o bien son problemáticas, o bien se basan en juicios subjetivos (como Holton) o en juicios retrospectivos sobre lo que fue inadecuado. “Considerando todo esto, me parece que todo lo escrito por historiadores, filósofos y científicos sobre si una hipótesis era o no ad hoc (y por lo tanto, propuesta de manera ilegítima) es energía desperdiciada” (Hunt, 2012:13).

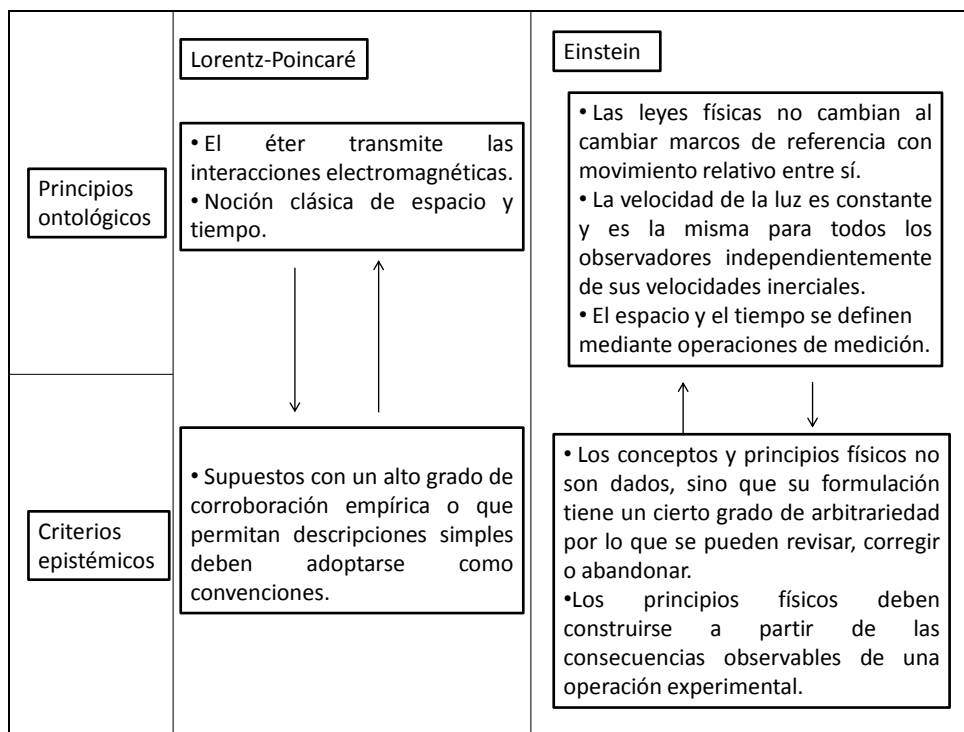


Tabla 4.3- Al centro los principios ontológicos de Lorentz-Poincaré y criterios en los que se apoyaban. Del lado derecho los de Einstein. Se muestra los puntos de desacuerdo entre ambos sistemas.

En cuanto a Einstein, podemos decir que comparte con Poincaré la búsqueda de principios generales que guíen la investigación en física. “Una teoría es tanto más impresionante cuanto mayor es la simplicidad de sus premisas, cuanto más diversas sean las cosas que conectan entre sí y cuanto más amplio sea su ámbito de aplicación.” (Einstein 1949/2003:39). Podemos ver la similitud entre Einstein y Poincaré en el hecho de que ambos buscan incorporar el principio de relatividad a la electrodinámica. Sin embargo, la manera en que ambos entienden el rol de principios como el de relatividad es diferente. Para Poincaré representan convenciones útiles y tales convenciones deben mantenerse porque han mostrado que permiten construir las representaciones más simples posibles. Los conceptos clásicos de espacio y tiempo se mantienen por la misma razón, son conceptos que han probado ser útiles en una gran variedad de contextos por lo que deben mantenerse. Aquí es dónde vemos la diferencia con Einstein. No hay una razón de peso para mantener los conceptos tradicionales de espacio y tiempo en el razonamiento de Einstein. Es decir, la concepción clásica del espacio y el tiempo se había visto como justificada hasta inicios del siglo XIX, incluso para Lorentz y para Poincaré²⁶, cuando Einstein considera que, de hecho, no estaba justificada tal concepción. Para Einstein, la simultaneidad de eventos distantes debe definirse a partir de operaciones de sincronización de relojes. El criterio de

²⁶ A lo largo de la historia, y hasta antes del siglo XX, podemos encontrar autores que discuten diversos aspectos del espacio y el tiempo. El aspecto clásico al que me refiero aquí es el de la simultaneidad absoluta, es decir, hasta antes de Einstein se había visto como justificada la idea de que si dos eventos son simultáneos para un observador, entonces deben serlo para todos los observadores.

Einstein que difiere del de Poincaré consiste en considerar que los conceptos pueden ser revisados si no han sido definidos en términos de consecuencias observables de operaciones de medición. Para Einstein, no hacer esto puede llevar a introducir, inadvertidamente, supuestos físicos incorrectos. En otras palabras, Poincaré considera que el uso exitoso de un determinado principio físico es razón suficiente para mantenerlo, mientras que Einstein considera que, aunque los principios físicos sí son apoyados por su éxito empírico, también debemos reconocer que los tales principios, aun aquellos que parecen dados, a priori o necesarios para el pensamiento, poseen un cierto grado de arbitrariedad.

Debido a esta arbitrariedad es que, Einstein considera, debemos eliminar, mantener o modificar conceptos o principios físicos de manera que terminemos sólo con principios y conceptos formulados de tal manera que exhiban una adecuada capacidad operativa para capturar las relaciones entre fenómenos que los datos empíricos indiquen. “Hume vio claramente que determinados conceptos, el de causalidad, por ejemplo, no pueden derivarse del material de la experiencia mediante métodos lógicos... Yo estoy convencido, sin embargo que... Todos los conceptos, incluso los más próximos a la experiencia, son, desde el punto de vista lógico, supuestos libres, exactamente igual que el concepto de causalidad...” (Einstein, 1949/2003:22-23). Y es justamente esta libertad, que no está en Lorentz ni en Poincaré, la que le permite estipular una definición de simultaneidad basada en una operación física de coordinación de relojes. Con todo, Einstein no es meramente un seguidor del empirismo clásico puesto que, para él, lo importante no es que haya una inmediata conexión lógica entre las sensaciones de los sentidos y nuestras concepciones del mundo físico, sino las operaciones por las que conectamos ambas cosas. “Los conceptos y proposiciones sólo cobran sentido o contenido a través de su relación con experiencias de los sentidos. El nexos entre éstas y aquellos es puramente intuitivo, no es en sí de naturaleza lógica. Lo que diferencia a la vacía especulación de la verdad científica no es otra cosa que el grado de certeza con que se puede establecer esa relación o nexos intuitivo” (Einstein, 1949/2003:21). Lo adecuado o inadecuado de la manera en que establecemos estas conexiones se evalúa por la manera en que rescatamos las relaciones en los datos empíricos de los fenómenos. En el caso de Einstein, la redefinición del espacio y el tiempo mediante operaciones de medición resulta adecuada, entre otras cosas, porque permite eliminar la asimetría de la electrodinámica. Einstein veía dicha asimetría como consecuencia de que el principio de relatividad aun no había sido incorporado completamente, esto hacía insatisfactorios a los planteamientos previos puesto que dicho principio refleja las relaciones que los datos presentan entre sí. Para Poincaré, tal asimetría no permite distinguir si la Tierra se mueve dentro del éter o no, lo que ve como la esencia del principio de relatividad por lo que no considera que haya algo que cambiar. Pero Einstein considera que si los datos no distinguen marcos de referencia, el principio de relatividad constituye una cualidad intrínseca del mundo por lo que no es suficiente señalar que no se puede distinguir marcos de referencia en la práctica, también es necesario que no se distinguan en los principios físicos.

Resumiendo, considero que la distinción entre *principios físicos*, *modelos matemáticos* y *datos* permite identificar con claridad qué componentes de la práctica científica son los que Einstein abandona (principios físicos) y qué componentes conserva (modelos matemáticos, como las transformaciones de Lorentz y las ecuaciones de Maxwell, así como los datos). Pero además, se puede notar que lo que hace peculiar a los principios físicos de Einstein es que, a diferencia de los de Lorentz y Poincaré, éstos son métricos. Es decir, sus principios físicos resultan de un largo desarrollo de prácticas de medición. Como hemos visto, principios como el de relatividad, el de la constancia de velocidad de la luz o el del tiempo local se apoyan en conclusiones derivadas del estudio de la aberración estelar, los experimentos de Fizeau, los experimentos con el interferómetro, las investigaciones de Lorentz y Poincaré sobre el éter etc. Estas prácticas de medición habían encontrado dificultades y había más de una manera de modificar componentes de dichas prácticas para superarlas. Los principios físicos respecto del espacio y el tiempo pueden escogerse a la manera tradicional y modificar los modelos matemáticos como muestra el camino seguido por Lorentz, pero el camino de Einstein consistió en cambiar los principios físicos y mantener los datos previos (él personalmente no realiza nuevos experimentos u operaciones y sí da cuenta de los datos que se conocían) y los modelos matemáticos (en particular, mantiene las ecuaciones de Maxwell y las transformaciones de Lorentz). La novedad del camino de Einstein consiste en que al cambiar los principios físicos del espacio y el tiempo también cambia criterios epistémicos reconociendo que los principios clásicos del espacio y del tiempo no estaban adecuadamente apoyados por operaciones de medición y que debían estarlo. Reconocer esto marca un fin en el intento de enmarcar concepciones científicas por consideraciones que no estuvieran sustentadas por operaciones experimentales.

No es mucho decir que, cualquiera que debe ser el futuro de los desarrollos y descubrimientos acerca de la luz, o incluso si los detalles de la teoría de la relatividad de Einstein deban ser desacreditados algún día, una genuina revolución, y una que no retrocederá, ha tenido efecto en la teoría del origen, naturaleza y prueba de las ideas científicas. (Dewey 1929:146).

Capítulo 5

Relatividad general, crisis cognitiva e integración.

Como hemos visto, cambios radicales en el entendimiento de la gravitación no se debieron a la invención de nuevos paradigmas o a la creación de nuevas ideas *ex nihilo*, sino a procesos a largo plazo de acumulación e integración de las fuentes de conocimiento que precedieron a dichos cambios. Fue esta evolución del conocimiento la que también produjo tensiones dentro de las estructuras cognitivas existentes así como el potencial para resolverlas... (Jürgen Renn, *Classical Physics in Disarray. The Emergence of the Riddle of Gravitation*, 2007:30)

1. Introducción

Poco después de que Einstein cambiara los principios físicos de espacio y tiempo por el principio cualitativamente diferente y nuevo de espacio-tiempo, en 1905, se fue haciendo claro que dicha reformulación sugería nuevos cambios, en especial, en lo que se refiere a los modelos matemáticos. Dado que en física se había usado el espacio de Euclides de manera que los ejes en el plano cartesiano representaran mediciones de distancias, era claro que ahora hacía falta una nueva manera de capturar, geoméricamente, lo que podemos entender como una distancia en el espacio-tiempo. El matemático Hermann Minkowski, en 1908, fue el primero en encontrar una manera adecuada de representar, geoméricamente, la nueva cinemática que era consecuencia de la relatividad especial. Sin embargo, tanto el nuevo concepto de espacio-tiempo de Einstein como el formalismo desarrollado por Minkowski mostraron sus límites al tratar con sistemas de referencia acelerados. Poco a poco se hizo claro que tomar en cuenta las mediciones en sistemas acelerados requería nuevas consideraciones. Adicionalmente, la diferencia entre sistemas inerciales y sistemas acelerados había permitido a Newton argumentar a favor de la sustancialidad del espacio debido a que los efectos físicos que tiene la aceleración en los objetos no parece que se puedan reducir a relaciones entre fenómenos, por lo que el espacio absoluto debía ser el causante de tales efectos²⁷. A este respecto, Einstein buscaba vindicar la respuesta de Mach a este argumento de Newton, dicha respuesta consistía en considerar la posibilidad de que distinguir entre sistemas acelerados e inerciales podía estar relacionado, de alguna manera, a la distribución de materia a gran escala en el universo y no a los efectos de la sustancialidad del espacio.

²⁷ El ejemplo que Newton utilizaba, para explicar esto, era el de una cubeta con agua la cual se pone a girar hasta el punto en que la cubeta transmite dicho movimiento al agua. Lo que sucede entonces es que el agua se pandea (el nivel del agua sube por los bordes y disminuye en el centro). Dicho efecto no parece que se pueda explicar mediante la idea del movimiento relativo. Es decir, un observador que se mueve alrededor de la cubeta cuando ésta está en reposo no verá al agua pandearse. Las relaciones de distancia y movimiento puede ser la misma en los dos casos (el caso en el que es el agua la que presenta el movimiento circular y el caso en el que es el observador el que realiza un movimiento circular alrededor de la cubeta), pero los efectos físicos no son los mismos por lo que Newton concluía que el concepto de espacio no puede concebirse únicamente como una relación entre objetos (Cfr. Marquina 2006:187-192).

Por otro lado, las prácticas de medición de superficies terrestres, durante los siglos XVIII y XIX, habían sugerido a investigadores como Gauss la posibilidad de crear nuevos sistemas geométricos, el desarrollo de los mismos fue uno de los avances más notables de la matemática del siglo XIX, como mencioné en el capítulo 2. Pronto Einstein descubrió que el uso de dichos sistemas sugería nuevas operaciones posibles para tratar con los conceptos de espacio y tiempo. Aquí la dificultad no era sólo cómo modificar la geometría, sino cómo integrar todo un nuevo sistema geométrico con la física. Cuando Einstein finalmente encontró la manera concreta de hacer esto, fue capaz de dar formulaciones más generales para su concepto de espacio-tiempo y, lo que es más, podía reinterpretar a la gravedad como un desplazamiento natural en su geometría con lo que ésta dejaba de ser una entidad misteriosa para convertirse en un efecto de la geometría del espacio-tiempo.

El objetivo de este capítulo es analizar cómo las dificultades que generaron las aportaciones de Einstein de 1905, examinadas en el capítulo anterior, llevaron a lo que hoy conocemos como relatividad general. Esto representa la primera aplicación exitosa de las geometrías no euclidianas en física, por lo que constituye, posiblemente, el primer caso de una *crisis cognitiva* en la historia de la ciencia. Es decir, por primera vez se utilizaron modelos matemáticos basados en fundamentos matemáticos diferentes, ya que, hasta entonces, los modelos geométricos se habían basado en geometría euclidiana desde la antigüedad. En este capítulo analizo el proceso que dio lugar a dicha crisis cognitiva.

2.- El artículo de 1907 y las primeras consideraciones de Einstein sobre sistemas de referencia acelerados

A pesar de sus logros de 1905, aun había dificultades relevantes que Einstein identificaba en la física y que, en parte, eran consecuencia de sus propias aportaciones:

La teoría especial de la relatividad debe su creación a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Y a la inversa: estas últimas no son captadas formalmente de modo satisfactorio sino a través de la teoría especial de la relatividad... Lo cual sería de suyo satisfactorio si no supiésemos, por los fenómenos cuánticos, que la teoría maxwelliana no hace justicia a las propiedades energéticas de la radiación; y en punto a cómo cabría modificar de manera natural la teoría de Maxwell, ni siquiera la teoría especial de la relatividad brinda ningún punto de apoyo adecuado, como tampoco tiene ninguna respuesta a la pregunta de Mach '¿Cómo es que los sistemas inerciales se distinguen físicamente de otros sistemas de coordenadas?' (Einstein, 1949/2003:64-65).

Aquí Einstein señala un par de cuestiones que quedan sin resolver. En relación a lo que dice de Mach, Einstein está aludiendo a una distinción que parece existir entre sistemas inerciales y sistemas acelerados, lo que, en su momento, le permitió a Newton argumentar a favor de la sustancialidad del espacio (concepción que toma al espacio como una entidad sustantiva y no como relación). En otras palabras, Einstein comenzó a pensar las consecuencias que sus ideas podían tener respecto de los sistemas acelerados.

Los primeros pasos de Einstein hacía una investigación sobre dichos sistemas acelerados comenzaron con un artículo de 1907 titulado ‘*On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn From It*’, aquí Einstein analiza una consecuencia particular de sus artículos de 1905. Tal consecuencia era la asociación de la masa inercial con la energía. Esto le hacía preguntarse si la energía también podía relacionarse con la masa gravitacional. “Una siguiente pregunta que se sugiere es si el principio de relatividad está limitado a sistemas en movimiento no acelerados.” (Einstein 1907:254-255). La preocupación por estas tres cosas; masa, energía y sistemas acelerados, surge porque la relatividad especial parecía asociarlas. Para entender la relación hay que recordar que, en la época, había dos maneras de concebir la masa; una era la masa inercial, es decir, se asociaba el concepto de masa con la resistencia de un cuerpo a salir de su estado de reposo o movimiento inercial. La otra era la gravitación, es decir, la masa también podía entenderse como la propiedad de un cuerpo de generar atracción gravitacional. En otras palabras, había una masa inercial y una masa gravitacional. Experimentos como los de Eötvös, de 1890, habían mostrado, mediante el uso de balanzas de torsión, que la masa inercial y la masa gravitacional tenían el mismo valor para todos los cuerpos. Ahora, la relatividad especial tenía como consecuencia que la masa inercial de un sistema físico aumentaba con la energía total²⁸. De manera que lo que se preguntaba Einstein era si, entonces, la masa gravitacional también debía aumentar con la energía total. Pero un sistema sometido a una acción gravitacional es un sistema acelerado por lo que este camino llevaba a considerar las consecuencias que la relatividad especial pudiera tener en el estudio de sistemas acelerados.

Para investigar sobre este punto, Einstein postula, en su mismo artículo de 1907, que si consideramos dos sistemas en movimiento, uno con una aceleración constante γ y otro en reposo, pero sometido a un campo gravitacional que acelera a los objetos en una magnitud $-\gamma$, entonces ambos son equivalentes, es decir, las leyes físicas no difieren en los dos casos. En otras palabras, no parece que sea posible distinguir un sistema que sufre una aceleración de uno sometido a un campo gravitacional. Una manera de ver esta similitud es pensar en una persona encerrada en una cámara o habitación cerrada que se encuentra en caída libre, en este caso la persona no podría saber si en efecto está en caída libre o flotando en un estado libre de gravedad. En ambos casos podría flotar igualmente dentro de la cámara. Por otro lado, si la cámara estuviera en reposo, pero sometida a gravitación, el observador dentro de la cámara tampoco podría distinguir si la cámara está realmente en reposo dentro de un campo gravitacional o está siendo acelerada hacia arriba sin que exista ningún campo gravitacional. En ambos casos se sentiría atraído hacia el suelo. A esta similitud entre un sistema acelerado y uno sometido a gravitación se le conoció como ‘*principio de equivalencia*’, Einstein llegó a referirse a dicho principio como la idea más feliz de su vida y tendría una importante función heurística en la investigación de los años siguientes, ya que permitía estudiar sistemas acelerados en casos más accesibles, como los de rotación, y trasladar las conclusiones a casos, aparentemente, más misteriosos como los de la gravedad. Los sistemas acelerados se habían estado considerando diferentes entre sí debido a que la fuerza o

²⁸ La relación entre la masa y la energía se puede apreciar en la famosa ecuación $E = m_0c^2$.

acción que causaba la aceleración podía ser diferente en cada caso. Aquí podemos ver ya el intento de eliminar la distinción entre sistemas acelerados, lo que era un primer paso en la búsqueda de eliminar o reducir la distinción de éstos y los sistemas inerciales para reivindicar la idea de Mach que guiaba a Einstein.

Más adelante, en el mismo artículo, Einstein muestra que un efecto como la dilatación del tiempo se genera en sistemas acelerados y, por lo tanto, también debe generarse en campos gravitacionales, de tal manera que el tiempo cambia entre sistemas de referencia sometidos a campos gravitacionales diferentes (dilatación gravitacional del tiempo)²⁹. Pero lo más relevante aquí es una primera instancia del efecto que llevaría, eventualmente, a la predicción de datos que permitiría establecer las conclusiones posteriores de Einstein en relación a este tema. Al considerar el caso de fenómenos electromagnéticos, Einstein concluía que debía ser posible que un rayo de luz, a pesar de no poseer masa, fuera alterado en su dirección por campos gravitacionales³⁰. Pensemos, por ejemplo, que si dentro de una cámara que sufre aceleración en una dirección vertical producimos un rayo de luz a cierta altura, desde una de las paredes, y éste es dirigido en dirección horizontal, entonces dicho rayo llegará a la pared opuesta a una altura ligeramente diferente de la que partió, y, por el principio de equivalencia, lo mismo debe suceder si la cámara está en reposo, pero sometida a un campo gravitacional (figura 5.1). Otra consecuencia era que el efecto Doppler, en la luz, también se vería afectado por un campo gravitacional. Einstein consideraba que estos dos efectos serían muy pequeños para ser observados, pero posteriormente corregiría sus cálculos y la desviación de la luz debido a campos gravitacionales sería corroborada en 1919.

²⁹ Para llegar a esta conclusión, Einstein considera un sistema Σ con una aceleración constante γ y procede a comparar dos relojes, separados una distancia dada, en dicho sistema. Para ello considera otros dos sistemas S y S' , pero que no están acelerados, es decir, que son inerciales. A un cierto tiempo, S coincide con Σ de manera que los relojes están sincronizados y la velocidad entre ellos es $v=0$ en ese momento. S' se mueve con una velocidad relativa a S en la misma dirección de la aceleración de Σ de tal manera que dicha velocidad se puede expresar como $v=\gamma t$. Adicionalmente considera que los relojes de S' están sincronizados con los de Σ . Ahora, procede a identificar la influencia de la aceleración en el tiempo que miden los relojes en Σ después de un cierto intervalo de tiempo. El intervalo de tiempo considerado es tan pequeño que se puede desprestigiar términos de segundo orden. Como el intervalo es pequeño, aun se puede usar los relojes en S' y la constancia de la velocidad de la luz para definir la proporción entre relojes en Σ de la manera siguiente. Considerando los dos relojes en Σ , éstos se mueven de la misma manera respecto de S por lo que siguen sincronizados en relación a S , pero no a S' y, por lo tanto, no entre ellos. Definiendo el tiempo τ de Σ de manera que en uno de los relojes $t = \tau$. Ahora, Einstein define la simultaneidad utilizando S' entre dos eventos (1 y 2) obteniendo la condición: $t_1 - \frac{vx_1}{c^2} = t_2 - \frac{vx_2}{c^2}$. De manera que 1 corresponde al origen de Σ y 2 al punto $(\xi, 0, 0)$ donde la lectura del reloj marca σ . Entonces $x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1 = \xi$, $t_1 = \tau$, $t_2 = \sigma$ y $v = \gamma t$. Sustituyendo estos valores y resolviendo para σ obtenemos la expresión: $\sigma = \tau \left(1 + \frac{\gamma \xi}{c^2}\right)$. Y por el principio de equivalencia obtiene $\sigma = \tau \left(1 + \frac{\varphi}{c^2}\right)$ donde φ es la diferencia de energía potencial gravitacional entre 1 y 2. En otras palabras, los relojes varían si están localizados en posiciones sometidas a potenciales gravitacionales diferentes.

³⁰ A propósito de este tema Pais menciona una cita de Newton que parece casi profética: “Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action (*caeteris paribus*) strongest at the least distance?” Isaac Newton: *Opticks*, Query 1. Lo que sucede es que en la teoría corpuscular de Newton sí cabría esperar que la gravedad desviara a la luz, pero el efecto sería mucho menor que el que predice la relatividad general en su versión de 1915-16.

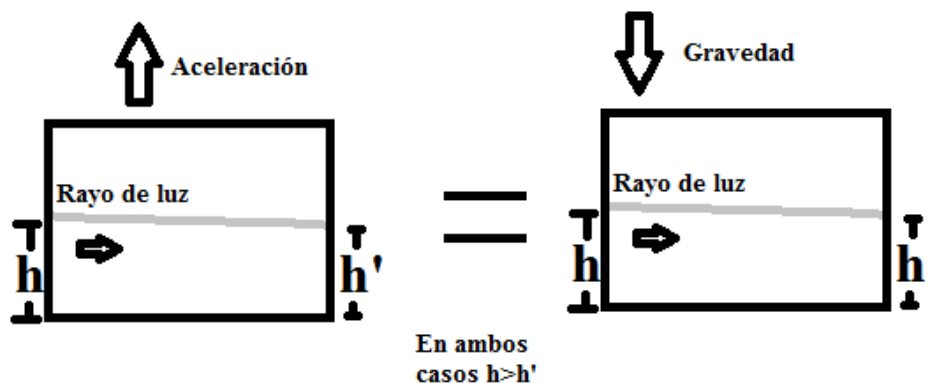


Figura 5.1- Del lado izquierdo se muestra una cámara acelerada uniformemente hacia arriba. Se produce un rayo de luz en la pared izquierda a una altura h , para cuando éste llega al otro lado, la cámara completa se ha movido ligeramente hacia arriba de manera que el rayo toca la pared a una altura h' que es ligeramente menor a h . El principio de equivalencia implica que el mismo efecto debe producirse si la cámara no está en movimiento, pero es sometida a un campo gravitacional.

Sin embargo, estas conclusiones presentaron nuevas dificultades e incoherencias que había que resolver. Un primer punto era que “El hecho de la igualdad entre masa inercial y pesante nos lleva así de forma enteramente natural a reconocer que el postulado básico de la teoría especial de la relatividad (invariancia de las leyes frente a las transformaciones de Lorentz) es demasiado estrecho,” (Einstein 1949/2002:68). Esto se debe a que el principio de relatividad sólo hace que las leyes de la física sean iguales para todos los marcos de referencia inerciales, pero no para marcos de referencia acelerados. Cualquier sistema, o marco de referencia, sometido a una fuerza, como la de gravedad, es un sistema acelerado. Estos sistemas se distinguen de los inerciales porque están asociados a una fuerza que genera dicha aceleración. Algunas dificultades relevantes que surgen al aplicar el viejo principio de relatividad a estos sistemas se exponen en la siguiente sección. Pero antes hay que mencionar que el tema era importante porque si era posible generalizar el principio de relatividad para que no sólo se aplicara a marcos de referencia inerciales sino para todos los marcos de referencia, acelerados o no, entonces no sólo el principio de equivalencia podía usarse para alcanzar una mejor comprensión de la gravedad, sino que la idea de Mach contra la sustancialidad del espacio quedaría completamente reivindicada. Es decir, no habría nada particular en los sistemas acelerados que no pudiera explicarse más que por los efectos de un espacio sustancial. “Esto ocurría en 1908. ¿Por qué hicieron falta otros siete años para establecer la teoría general de la relatividad? El motivo principal radica en que no es tan fácil liberarse de la idea de que las coordenadas deben poseer un significado métrico inmediato” (Einstein, 1949/2002:68). En otras palabras, la relación que debía haber entre coordenadas (geometría) y mediciones comenzaba a mostrarse poco clara al considerar sistemas acelerados. Al mismo tiempo, hay que reconocer que las ideas de Einstein respecto del principio de equivalencia representaban sólo un primer paso, todavía no estaba claro cómo sería posible

generalizar el principio de relatividad, más aún, la matemática de la relatividad especial comenzó a mostrar sus límites cuando los sistemas acelerados entraron en consideración.

3.- Límites de la relatividad especial

3.1 Los obstáculos

Un primer obstáculo que se presentó para aplicar la relatividad especial a sistemas acelerados, como los sometidos a fuerzas gravitacionales, tenía que ver con el principio de Galileo. Dicho principio expresa la idea de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración³¹. Sin embargo, la relatividad especial requiere que un cuerpo que cae con una velocidad distinta a la de otro, sufra una aceleración, también, distinta. Se requería que la masa gravitacional aumentara de la misma manera que la masa inercial para que pudiera conservarse el principio de Galileo, pero “Resultó, sin embargo, que no era fácil preservar este principio en la teoría de campo gravitacional en la relatividad especial dado que parece implicar, directamente de la implementación de la ecuación de campo gravitacional clásica en el contexto de la relatividad especial, que los cuerpos que caen con aceleraciones diferentes en un campo gravitacional si sus velocidades inerciales, y por lo tanto sus masas inerciales, son diferentes”(Renn, 2007a:55). Para explicar este punto, Jürgen Renn (2007a) propone el siguiente ejemplo: Considérese dos objetos A y B que se dejan caer desde la misma altura, y exactamente al mismo tiempo, en un campo gravitacional, pero B lleva una velocidad horizontal además de la aceleración vertical que sufre debido a la gravedad. De acuerdo a la física clásica, ambos cuerpos deben tocar el suelo de manera simultánea, tanto si esto es juzgado por un observador que se mueve en dirección horizontal con la misma velocidad que B como si permanece con una velocidad horizontal nula respecto de A. Sin embargo, en la relatividad especial eventos simultáneos en un marco de referencia no son simultáneos en otro. “El principio de Galileo, de acuerdo con el cual, todos los cuerpos caen con la misma aceleración, puede, por lo tanto, no ser válido en ambos marcos de referencia; por lo tanto no puede ser válido en absoluto” (Renn, 2007a:55).

Por si esto fuera poco, la misma relatividad especial, que no permite que algo viaje más rápido que la luz, parece difícil de conciliar con una acción a distancia que se transmite de manera instantánea, como la fuerza de gravedad newtoniana³², de manera que, además, se satisfaga el

³¹ En mecánica clásica esto es consecuencia de la igualdad entre masa gravitacional y masa inercial. Por un lado tenemos que $F = m_i a$, con ‘F’ representando fuerza, ‘ m_i ’ masa inercial y ‘a’ aceleración. Por otro la ley de gravitación de Newton: $F = \frac{GMm_g}{r^2}$ con ‘G’ constante, ‘M’ y ‘ m_g ’ la masa gravitacional de dos cuerpos y ‘r’ la distancia entre ellos.

Podemos igualar ambas ecuaciones y obtener: $m_i a = \frac{GMm_g}{r^2}$ de lo que se sigue que si $m_i = m_g$ entonces $a = \frac{GM}{r^2}$ sin importar el valor de m_i .

³² Estrictamente Newton no dijo que la gravedad fuera instantánea y es posible que considerara que no lo fuera, pero su física es compatible con que, de hecho, sí fuera instantánea y no hay nada en sus ecuaciones o en sus principios físicos que sugiera algún tipo de retraso en la acción de la gravedad. (Cfr. Maudlin 2012:127)

principio de equivalencia³³. Debido a esto, Einstein esperaba construir una explicación de la gravedad utilizando el concepto de campo de manera análoga al del campo electromagnético. Es decir, así como las cargas eléctricas generan un campo eléctrico que puede afectar otras cargas, Einstein esperaba que los objetos masivos generaran un campo gravitacional. Pero hay una dificultad adicional relacionada a la fuente de dicho campo gravitacional. En física clásica la densidad de masa es la que actúa como fuente de la gravedad, pero por la relación entre masa y energía, que Einstein había establecido en 1905, parecía hacer necesario que la energía, en cualquiera de sus formas, funcionara como fuente de la gravedad. “¿Pero en qué forma la energía de un sistema físico extenso debería actuar como fuente de un campo gravitacional? Se sigue de la relación masa-energía... que el comportamiento inercial de tal sistema ya no puede ser fácilmente caracterizado por una sola función tal como la masa inercial clásica” (Rënn, 2007a:55-56). En otras palabras, todo lo que previamente se había necesitado para representar la fuente del potencial gravitacional era la ecuación clásica de Poisson, pero no sólo no parecía suficiente sino que “semejante teoría escalar del campo gravitacional no es fácil hacerla invariante con respecto al grupo de transformaciones de Lorentz.” (Einstein 1949/2003:65-66).

Pero la dificultad que parece haber mostrado a Einstein el camino a seguir surgió de un argumento que considera los efectos de la relatividad especial en un disco rotante. De acuerdo con la investigación de John Stachel (1980), la primera mención de Einstein acerca de este caso fue en una carta fechada el 29 de septiembre de 1909 dirigida a Arnold Sommerfeld (1868-1951). En dicha carta, Einstein comenta su interés en las discusiones sobre el movimiento de cuerpos rígidos en relatividad especial debido a la importancia que tenía para sus intentos de extender el principio de relatividad a sistemas acelerados. Por las mismas fechas, Paul Ehrenfest (1880-1933) publicó un artículo sobre este tema por lo que se conoció como ‘paradoja de Ehrenfest’. En escritos posteriores (cómo en *The Meaning of Relativity*, 1922/1970:34-35), Einstein menciona esta paradoja en el contexto de su interpretación del principio de equivalencia. La cuestión es la siguiente: Considérese un disco de un material rígido³⁴ en el que colocamos un gran número de pequeñas reglas rígidas a lo largo de la circunferencia y ponemos otras en el radio del disco con el fin de medir ambos. Si U es el número de reglas que caben en la circunferencia y D el número que caben en el radio, entonces la proporción U/D debe ser π (pí). Si hacemos que el disco rote a gran velocidad, de acuerdo con la relatividad especial, las reglas sufrirán una contracción de su longitud en la dirección de su movimiento, medidas con respecto a un observador en reposo (contracción de Lorentz), por lo que ahora podríamos colocar más reglas en la circunferencia (desde el punto de vista de un observador en reposo) pues las que estaban se han contraído y han dejado espacio para otras. Pero las reglas que se encuentran a lo largo del radio del disco no se han contraído a lo largo puesto que no hay movimiento en la dirección del radio, sólo en dirección

³³ Hay que enfatizar que lo difícil no era el hecho de incorporar la fuerza de gravedad en la relatividad especial por sí sólo. Había varias maneras de hacerlo. Un ejemplo se puede encontrar en el artículo de Poincaré de 1906 sobre la dinámica del electrón. Lo difícil era hacerlo de manera que se incorporó también el principio de equivalencia.

³⁴ En física un cuerpo rígido es aquel que no sufre deformaciones, es decir, uno cuyas moléculas mantienen sus posiciones relativas. Propiamente no existen los cuerpos completamente rígidos, son más bien una idealización. Este concepto es importante para el argumento como se verá.

perpendicular. Por lo que se sigue que ahora la proporción U/D tendrá un valor más grande que π . Esto no ocurre en geometría euclidiana (figura 5.2).

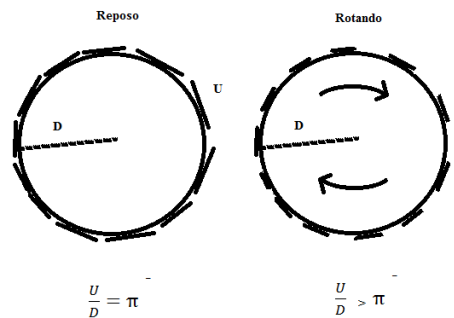


Figura 5.2- Paradoja del disco rotante o paradoja de Ehrenfest. La relatividad especial parece requerir que al girar, la circunferencia de un círculo se contraiga de manera que para un observador en reposo la proporción de lo que mide la circunferencia entre lo que mide el radio sea mayor que π lo que no puede ocurrir en geometría euclidiana.

Una conclusión similar se puede deducir para el tiempo. Podemos colocar un reloj en la periferia del disco y uno en el centro. De nuevo, para un observador en reposo, fuera del disco, el reloj en la periferia medirá que el tiempo transcurre más lentamente que el reloj en el centro, dado que el primero está en movimiento. Lo mismo debe suceder si se juzga por un observador situado en el centro del disco. Ahora, si recordamos el principio de equivalencia, de acuerdo con el cual un sistema de coordenadas acelerado (como uno que se ha fijado respecto del disco en rotación) puede ser considerado un sistema en reposo sometido a un campo gravitacional, entonces podemos concluir que los mismos efectos para las mediciones de distancias y tiempos que ocurren en el disco rotante ocurrirán también en campos gravitacionales. “Llegamos por tanto al resultado: el campo gravitacional influencia e incluso determina las leyes métricas del continuo espacio-tiempo. Si las leyes de configuración de cuerpos rígidos ideales van a ser expresadas geoméricamente, entonces en la presencia de un campo gravitacional la geometría no es euclidiana” (Einstein, 1922/1970:34). Parece ser que el argumento del disco rotante fue lo primero que le sugirió a Einstein que debía representar el campo gravitacional mediante una geometría distinta a la de Euclides. Aquí vemos cómo los principios físicos llegaron a excluir un determinado sistema geométrico. Con todo, hay que mencionar que el argumento tenía algunas dificultades que se debían, principalmente, a que era necesario concebir un cuerpo rígido que permita tal rotación, pero en la relatividad espacial no es claro que esto sea posible. Una forma de ver la dificultad es considerar, por ejemplo, que un observador podría medir el tamaño de un cuerpo rígido, mientras que otro observador mediría un tamaño diferente si tiene una velocidad relativa distinta de cero respecto al primer observador. Más aún, el mismo observador puede medir tamaños diferentes para el mismo cuerpo supuestamente rígido si cambia su velocidad relativa respecto de él. De acuerdo con Stachel (2007:89-90), Einstein superó esta dificultad abstrayendo el concepto de movimiento rígido y separándolo de la necesidad de considerar

cuerpos que, de hecho, fueran rígidos: “Si cuerpos rígidos son incompatibles con la teoría especial [de la relatividad], los movimientos rígidos no lo son” (Stachel, 2007:89). Sea como sea, es cierto que “... la noción de que la geometría espacial en un disco rotante no sería euclidiana jugó un importante papel heurístico para [Einstein]” (Janssen, 2014:181).

3.2 Primer intento de algunos físicos de capturar la nueva noción de espacio-tiempo en geometría.

Lo que las dificultades anteriores muestran es que la manera en que Einstein había reformulado los conceptos de espacio y tiempo, en 1905, como relaciones métricas, hacía necesario buscar nuevas explicaciones de diversos fenómenos conocidos, principalmente de la gravedad, que fueran consistentes con dichas reformulaciones. Además, el caso del disco rotante le mostró a Einstein que las viejas herramientas matemáticas parecían demasiado limitadas como para capturar su nueva noción de espacio-tiempo. La geometría que había funcionado adecuadamente para hacer modelos matemáticos de las situaciones físicas que utilizaban las nociones clásicas de espacio y tiempo parecía ya no ser suficiente desde los primeros años que siguieron a 1905 y se fue haciendo claro que era necesario recurrir a herramientas matemáticas que capturaran adecuadamente las nuevas relaciones de distancia y tiempo. El primer intento de hacer esto lo llevó a cabo, en 1908, un antiguo profesor de Einstein, Hermann Minkowski (1864-1909). Lo que Minkowski hizo fue construir un modelo matemático para capturar la nueva noción de espacio-tiempo de la relatividad especial. Para ello, utilizó un espacio geométrico similar al utilizado previamente, pero que consistía de cuatro dimensiones; tres espaciales y una temporal. Esto permitió dar una representación de la física que, a diferencia del anterior, ya no era estática, cada punto representa un evento más que un lugar. Adicionalmente, este, así llamado, espacio-tiempo de Minkowski rescata la relación entre eventos implícita en la relatividad especial. Para ello Minkowski introdujo un concepto diferente de distancia. Mientras que dicho concepto se interpretaba originalmente como una relación meramente espacial, en el espacio-tiempo de Minkowski representa tanto una relación espacial como temporal. Para ver esto, recordemos que, por el teorema de Pitágoras, podemos representar una distancia espacial en dos dimensiones (en el plano cartesiano) de la siguiente forma:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (5.1)$$

Donde ds^2 representa el cuadrado de la distancia que hay entre dos objetos separados por ‘ dx ’ unidades de longitud en un eje y ‘ dy ’ unidades en el otro eje³⁵. Ahora, si generalizamos a tres dimensiones, entonces hay que considerar un tercer eje ‘ dz ’, por lo que la distancia se representa por:

³⁵ Propiamente la ‘ d ’ en ‘ ds ’ representa que tal distancia es infinitesimal, pero creo que, por fines expositivos, resulta más claro llamar a ds (y a dx , dy etc.) solo distancia, ya que, el hecho de que sea infinitesimal no es relevante para la exposición.

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (5.2)$$

Para el espacio-tiempo de Minkowski es necesario agregar otra dimensión, pero ésta es temporal:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - cdt^2 \quad (5.3)$$

Con 'dt' representando la nueva dimensión temporal y 'c' la velocidad de la luz. Así *ds* actúa como lo que podemos llamar distancia en el espacio-tiempo, también se le ha llamado 'elemento de línea'. Considerar las distancias de esta manera permitía visualizar con más facilidad las características del espacio-tiempo de Minkowski. Esta manera de representar el espacio-tiempo era posible, entre otras razones, gracias a que las transformaciones de Lorentz dejan invariante el elemento de línea 5.3. De hecho, Poincaré había notado, en 1906, que las transformaciones de Lorentz pueden ser vistas como rotaciones en un espacio que deja invariante la forma cuadrática 5.3. Esta estructura le permitía a Minkowski representar gráficamente los efectos en las mediciones del espacio y tiempo para dos observadores con velocidades inerciales diferentes introduciendo nuevos ejes de coordenadas.

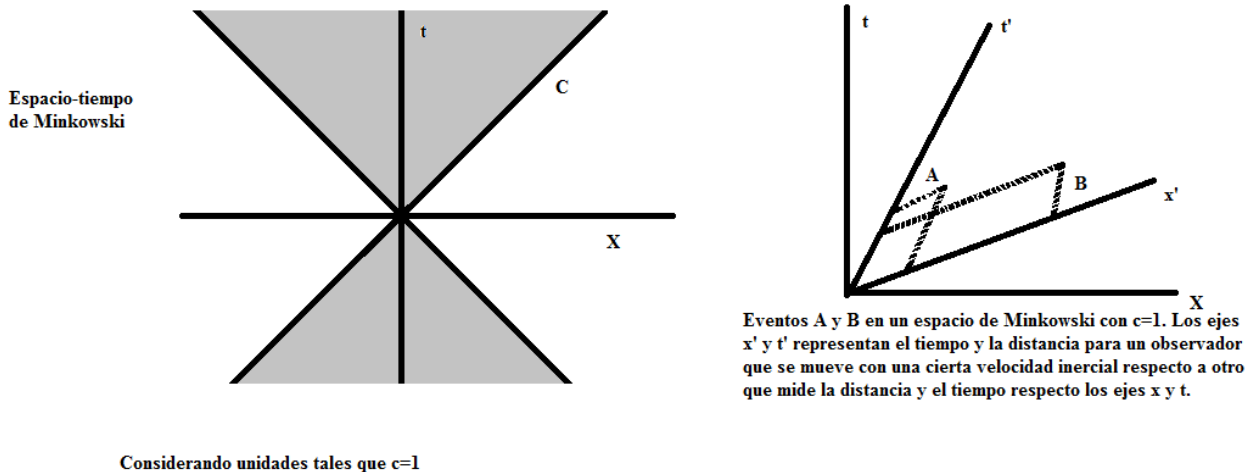


Figura 5.3.- Espacio-tiempo de Minkowski en unidades tales que *c* (la velocidad de la luz) toma el valor de una unidad. Esto permite que la velocidad de la luz sea representada como un eje a 45° de *x* y *t* (lado derecho). Del lado izquierdo se representa la medición de tiempo y distancia en el espacio tiempo de Minkowski para dos observadores con una cierta velocidad inercial uno respecto del otro.

Podemos ver cómo funciona el espacio-tiempo de Minkowski observando la figura 5.3. La zona sombreada en el diagrama del lado derecho representa los eventos separados del origen por una distancia y un tiempo que podría ser recorrido por una velocidad igual o menor a la velocidad de la luz (también se le conoce como espacio causalmente conectado debido a que la relatividad especial no permite relaciones causales entre eventos que se comunicaran por señales más rápidas que la luz). Del lado izquierdo de la misma imagen se muestran dos eventos A y B cuya posición espacio-temporal se determina para dos observadores. Un observador mide distancia y tiempo

mediante los ejes x y t mientras que el otro mide los ejes x' y t' . Se puede ver que para el observador que mide con x y t el evento A (que se representa ligeramente más abajo con respecto a B en el eje t) sucede antes que el evento B, mientras que para el que mide x' y t' el evento B sucede antes que A como muestran las líneas punteadas. Dicha inversión del orden temporal no puede ocurrir si los eventos pueden ser conectados por una línea que tiene una inclinación mayor a 45° , es decir, si pueden conectarse por señales que viajen a menor velocidad que la luz³⁶. La posibilidad de representar situaciones como ésta es una de las ventajas del formalismo de Minkowski.

Con todo, este desarrollo llevado a cabo por Minkowski no permite superar las dificultades expuestas en la sección 3.1. La relatividad especial exigía un ajuste de la matemática, pero aunque Minkowski lleva a cabo el ajuste pertinente para representar las relaciones métricas de la nueva concepción de espacio-tiempo propuesta por Einstein, dicho ajuste no es suficiente si uno quiere considerar las consecuencias que la relatividad implica para sistemas acelerados y, en particular, para una adecuada descripción de la gravedad en términos de las nuevas relaciones métricas. “Con base en el formalismo de Minkowski era posible, por ejemplo, reconocer inmediatamente que la ley de gravitación de Newton no es Lorentz-invariante, la expresión de Newton para la fuerza gravitacional no corresponde a un objeto geométrico en el espacio de Minkowski, ...” (Renn, 2007a:51-52). Utilizar el espacio-tiempo de Minkowski como punto de partida para buscar una manera de dar cuenta de la gravedad que fuera congruente con las conclusiones de la relatividad especial fue el camino tomado por Max Abraham (1875-1922). “En retrospectiva es claro que la aproximación de Abraham para una teoría de la gravitación relativista... llevaría a un callejón sin salida. Sin embargo, sólo explorando las consecuencias de esta aproximación es que eventualmente se hizo claro que no llevaba a ningún lado... De hecho, en gran parte se debió a Abraham que Einstein se familiarizara con los límites del formalismo de Minkowski y aprendiera cómo superarlos” (Renn, 2007b:305). Con todo, Einstein buscó que los desarrollos futuros de su búsqueda por una manera de dar cuenta de la gravedad y los sistemas acelerados no invalidaran la relatividad especial, sino que ésta siguiera siendo válida para los sistemas inerciales y que los nuevos descubrimientos fueran congruentes con ella, es decir, aunque no parecía que pudiera proporcionar un camino directo hacía una explicación de la gravedad, si se esperaba que fuera un elemento constitutivo de los próximos descubrimientos.

4.- Einstein y la geometría no euclidiana. Crisis cognitiva

Cuando Einstein mencionaba que la geometría que se requería para tratar el caso de sistemas acelerados, como el de la gravedad o el disco rotante, no era euclidiana se refería a que era necesario usar herramientas matemáticas muy distintas a las que se habían usado tradicionalmente en física, ni siquiera el formalismo geométrico de Minkowski era suficiente. El espacio-tiempo de Minkowski, en comparación con la geometría que Einstein usaría

³⁶ Esto es congruente con el hecho de que no hay relaciones causales fuera del cono de luz representado por la parte sombreada de la figura 5.3. Esto evita problemas de causalidad que la posibilidad de invertir el orden temporal de eventos podría sugerir.

eventualmente, aun guarda muchas similitudes con la geometría clásica de Euclides, de hecho, al espacio-tiempo de Minkowski se le suele llamar espacio ‘pseudo-euclidiano’³⁷. “Diferentes escritores describen la geometría cuatro-dimensional de Minkowski tanto como ‘euclidiana’, ‘no-euclidiana’ o incluso como ‘hiperbólica’” (Walter, 1999:95). Como sea que llamemos el espacio-tiempo de Minkowski, las dificultades que Einstein encontró para dar cuenta de sistemas acelerados parecían sugerir la necesidad de un ajuste aun más radical en la geometría a utilizar³⁸. Afortunadamente para Einstein, los matemáticos del siglo XIX habían estado explorando y desarrollando nuevos sistemas geométricos que, entre otras cosas, podían usarse para describir situaciones como la que Einstein había encontrado en la paradoja del disco rotante. En otras palabras, dado que Einstein llegó paulatinamente a la conclusión de que la geometría que se requería para dar cuenta de sistemas acelerados no era euclidiana, hay que considerar las opciones que el desarrollo de la geometría del siglo XIX había generado. Dichos desarrollos consistieron en el descubrimiento de las geometrías no euclidianas expuesto en el capítulo 2. En dicho capítulo, estas exploraciones de nuevos sistemas geométricos no se habían integrado al desarrollo de la física, pero ahora que la vieja geometría parecía demasiado limitada, la geometría no euclidiana era el recurso natural.

La investigación de Michael Friedman (2014) sobre los debates de finales del siglo XIX e inicios del XX sobre la aplicación de las geometrías no euclidianas en la física reconoce que, a diferencia de Helmholtz y Poincaré, lo que guiará a Einstein es un principio heurístico; el *principio de equivalencia*, es decir, el principio que requiere conectar la trayectoria de cuerpos ideales en sistemas acelerados con las trayectorias de los mismos sometidos a la acción de un campo gravitacional. Dicha trayectoria debe ser una geodésica, es decir, la trayectoria más corta en una superficie dada. El concepto de geodésica, es puramente matemático y lo que Einstein requirió es que sea tal que permita conectar las trayectorias de los cuerpos en sistemas acelerados con las que tendrían en un campo gravitacional. En otras palabras, para Einstein la geometría y la física se deben integrar de manera que permitan satisfacer el principio de equivalencia. Esto no se puede hacer con cualquier estructura geométrica por lo que para Einstein la elección de la geometría no es una mera convención como lo era para Poincaré. Einstein supera los debates pasados utilizando sus principios heurísticos como guía para escoger los conceptos geométricos que le permitan dar cuenta de las situaciones físicas que investiga. Las nuevas geometrías le permitirán a Einstein integrar sistemas acelerados, es decir, establecer relaciones métricas entre fenómenos; trayectorias en un sistema rotante y en uno sometido a gravitación. En pocas palabras

³⁷ Por un lado, se le suele llamar geometrías no euclidianas a las que no incorporan el quinto postulado de Euclides y la de Minkowski sí lo incorpora. Por otro lado, en el espacio-tiempo de Minkowski el concepto de distancia es muy diferente al que podemos encontrar en Euclides.

³⁸ Einstein llegó a ser consciente de esta necesidad entre 1907 y 1912. La carta dirigida a Sommerfeld, mencionada en la sección anterior, es de 1909 y parece ser la primera mención al argumento del disco rotante, pero no hay una mención explícita de que éste mostrara la necesidad de usar geometrías no euclidianas. Por otro lado, Einstein (1987:418) recuerda (en una nota agregada en 1923 a la edición checa de un libro de divulgación sobre la relatividad escrito originalmente por Einstein en 1916) haber considerado las ideas de Gauss sobre superficies curvas después de su regreso a Zúrich en 1912.

los principios físicos son los que eventualmente permitirán determinar el uso de la geometría. Esta manera de proceder resultó notablemente fructífera en contraste con la de otros investigadores como Poincaré y Helmholtz. Con todo la perspectiva que toma Einstein y las razones de su éxito pueden haber resultado más bien difíciles de comprender desde un punto de vista filosófico: “En particular, en la filosofía de la geometría legada por el empirismo lógico permanecemos ocupados con la problemática del convencionalismo y el comportamiento de cuerpos rígidos mucho después de que éstos hubieran perdido toda relevancia específica para las teorías físicas” (Friedman 2014:414). Es por ello que considero más adecuado hablar de una crisis cognitiva, es decir, lo que cambia no es sólo el uso de unas instancias de la matemática, sino que cambiaron los sistemas deductivos formales en los que su fundamentaba el diseño de modelos matemáticos particulares y, además, cambia la manera de integrar la geometría a la física. Ahora los nuevos principios físicos son los que determinan la elección de los sistemas geométricos.

5.- La búsqueda de Einstein por las ecuaciones de campo

Con todo, Einstein tenía pocos conocimientos sobre geometrías no euclidianas antes de 1912, posiblemente esto se debiera a las pocas aplicaciones que había para éstas en la física. No muchos físicos estaban familiarizados con este tipo de conocimientos, pero la situación era diferente entre matemáticos, de hecho, “... para los primeros años del siglo veinte, las geometrías no euclidianas habían encontrado un lugar respetable en los planes de estudio de los matemáticos en varias universidades alemanas, al tiempo que las técnicas de la geometrías euclidiana eran discutidas a nivel elemental en libros de texto, los cuáles solían colocar a la mecánica del espacio no euclidiano en el horizonte de la investigación matemática” (Walter, 1999:94). Al parecer, Einstein había recordado algunos elementos de los estudios de Gauss sobre superficies curvas poco después de su regreso de Praga a Zúrich³⁹, pero esto, por sí sólo, no era suficiente. Fue por ello que a partir de este año (1912), Einstein comenzó su colaboración con un antiguo compañero de clase y, para entonces, profesor de matemáticas Marcel Grossmann (1878-1936). Ambos trabajaron juntos en el desarrollo de la relatividad general de 1912 a 1914. Einstein regresaría posteriormente a Berlín y para noviembre de 1915 presentaría su solución final: las ecuaciones de campo gravitacional. Sin embargo, el camino hacia esta solución no fue directo a pesar de que todos los elementos para encontrarla estuvieron presentes desde que las geometrías no euclidianas fueron tomadas en consideración.

³⁹ Einstein había continuado trabajando en Berna, Suiza (donde había estado mientras trabajaba en la relatividad especial) hasta 1909, cuando se convirtió en profesor asociado en Zúrich. Posteriormente, Einstein se mudó a Praga en marzo de 1911, pero, de acuerdo con Pais (1982/2005:192-193), parece que nunca estuvo cómodo ahí de manera que, eventualmente, regresó a Zúrich en agosto de 1912. Fue en este momento que Einstein inició su colaboración con el matemático Marcel Grossmann. Posteriormente, Einstein aceptó, en diciembre de 1913, un puesto de profesor en la universidad de Berlín que comenzó a ejercer en abril de 1914. Permaneció ahí, en Berlín, hasta diciembre de 1932.

5.1- El espacio “le dice” a la materia cómo moverse y la materia “le dice” al espacio cómo curvarse.

Ahora, como se mencionó en la sección 3, Einstein había concluido que para dar cuenta de la gravedad, había que considerar que ésta actuaba de manera análoga al electromagnetismo, mediante la acción de un campo. Lo que Einstein buscaba ahora eran expresiones matemáticas que caracterizaran dicho campo; las ecuaciones de campo gravitacional. Dichas ecuaciones describirían como una partícula (tanto su masa como su energía) determinaría los efectos gravitacionales a su alrededor. El siguiente gran paso en esta dirección se puede encontrar en los artículos publicados en Praga, uno en 1911 y dos a inicios de 1912. El primero de éstos (Doc.23 del volumen 3 de *The Collected Papers of Albert Einstein*) contiene una revisión de algunos cálculos de 1907, y es la primera vez que Einstein concluye que la desviación de la luz por causa de la gravedad podría ser suficientemente grande como para que fuera posible detectarla. En los siguientes artículos Einstein explora las consecuencias de considerar que la gravedad desvía a la luz, puesto que, el movimiento de la luz ya no es completamente invariante lo que impide seguir usando las transformaciones de Lorentz en sistemas acelerados y esto tiene implicaciones en la manera en que definimos las mediciones de distancia y tiempo. En la relatividad especial, Einstein definía dichas mediciones de manera que la velocidad de la luz permaneciera fija, pero si la gravedad afecta el movimiento de la luz, entonces había que aclarar los efectos de la gravedad (o de la aceleración) en dichas mediciones. Es por ello que el segundo artículo, fechado a finales de febrero de 1912, (Doc.3 en el volumen 4 de *The Collected Papers of Albert Einstein*) contiene un intento de determinar la ecuación de movimiento para una masa puntual sometida a la acción de un campo gravitacional estático y de utilizar el principio de equivalencia para transformar dicha ecuación en una trayectoria descrita en un sistema acelerado libre de fuerza gravitacional. El tercer artículo de finales de marzo (Doc.4 en el volumen 4 de *The Collected Papers of Albert Einstein*), Einstein considera las consecuencias para el electromagnetismo y es aquí que Einstein encontró que los efectos de la gravedad en la velocidad de la luz estarían dados por una expresión cuadrática. Sin embargo, hasta aquí, Einstein sigue utilizando la geometría plana a pesar de que reconoce que ésta no es adecuada. Al parecer no estaba muy seguro de cómo proceder:

Describir las leyes físicas sin referencia a la geometría es similar a describir nuestros pensamientos sin palabras. Necesitamos palabras para expresarnos. ¿Qué deberíamos buscar para describir nuestro problema? Este problema estaba sin resolver hasta 1912, cuando se me ocurrió la idea de que la teoría de superficies de Karl Friedrich Gauss podía ser la clave a este misterio. (Einstein 1922/1982:47).

Pero antes de pasar a considerar el uso de las geometrías no euclidianas por parte de Einstein, hay que resaltar una de las conclusiones de los sus artículos de Praga respecto de la medición. Como se ha dicho, los sistemas de coordenadas representan mediciones de distancias y tiempos, pero, dado que la gravedad parecía alterar las mediciones, había que aclarar qué mediciones

representaban los sistemas acelerados. Por otro lado, desde Newton, la aceleración de un cuerpo se relacionaba directamente con una fuerza que causaba dicha aceleración. Einstein sigue usando esta relación, pero, en un comentario al final del segundo artículo, señala la posibilidad de reinterpretar sus ecuaciones (usando cálculo variacional, en particular, ecuaciones Euler-Lagrange, que tradicionalmente se había usado en mecánica analítica) como movimiento restringido, lo que parece más afín a la idea de la interacción de un cuerpo con un campo. El formalismo utilizado aquí le permitía obtener una expresión para el movimiento de una partícula que sigue la trayectoria más directa entre dos puntos en un espacio libre de gravedad, es decir, en un espacio-tiempo como el de Minkowski:

$$\delta\left(\int \sqrt{cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}\right) = 0 \quad (5.4)$$

Comparece esta expresión con la ecuación 5.3. Lo que esta ecuación expresa es que la trayectoria mínima entre dos puntos del espacio que una partícula puede recorrer está dada por la expresión dentro de la integral, es decir, en el espacio-tiempo de Minkowski la trayectoria mínima entre dos puntos está dada por 5.3 que es la manera en que habíamos definido el elemento de línea en el espacio-tiempo de Minkowski y cuyo valor no cambia bajo transformaciones de Lorentz. Ahora, para tomar en cuenta sistemas acelerados hay que agregar un término que indique cómo la aceleración altera las mediciones, de manera que permita cambiar de un sistema de referencia a otro y mantener el valor del elemento de línea. En otras palabras, las mediciones se alteran en sistemas acelerados por lo que, para pasar de un sistema acelerado a otro, necesitamos un factor que caracterice concretamente los cambios que introduce una aceleración dada. Necesitamos un tensor métrico. Después de su regreso de Praga a Zúrich, Einstein se dio cuenta de que una generalización de la ecuación de movimiento lleva a la expresión:

$$\delta\left(\int \sqrt{\sum_{i,j=1}^4 g_{ij} dx_i dx_j}\right) = 0 \quad (5.5)$$

La expresión $dx_i dx_j$ es una manera corta de expresar 5.3. Ahora, sin embargo, se incluye diez variables independientes que conforman el tensor g_{ij} . Dicho tensor, caracteriza la aceleración del sistema de coordenadas y, por el principio de equivalencia, también puede interpretarse como la caracterización del potencial gravitacional. De esta manera Einstein también encontró un significado físico para las coordenadas. Las dx son coordenadas que se relacionan con magnitudes medibles que representan el elemento de línea invariante con la ayuda de las componentes del tensor métrico g_{ij} mediante la siguiente expresión:

$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^4 g_{ij} dx_i dx_j \quad (5.6)$$

Que se puede interpretar como una geodésica en una superficie. Una vez hecho esto "...la analogía entre la generalización del concepto de una línea recta a una geometría curva y del concepto de un movimiento inercial a unas situación en la que sistemas de referencia acelerados

son admitidos, debe haber sido inmediato, en particular dado que el movimiento libre de fuerza y las geodésicas también están conectados en la física clásica” (Renn 2007a:72).

Para entender la relación entre la gravedad y la geometría, que estos desarrollos comenzaron a sugerir, podemos considerar el siguiente caso: supongamos que dos personajes viven en un espacio curvo, como una esfera, pero no lo saben, ellos creen que viven en un espacio plano como el de Euclides. Por alguna razón ellos quieren caminar en la misma dirección, pero manteniendo su distancia. Como saben geometría de Euclides, deciden seguir rectas paralelas, para ello miden ángulos rectos respecto de una línea imaginaria que los uniría. Creen que su camino será como el de la figura 5.4 del lado izquierdo, pero como, de hecho, viven en un espacio esférico terminan encontrándose (figura 5.4 lado derecho). Ellos se sorprenden puesto que estaban siguiendo rectas paralelas y en ningún momento trataron de cambiar de dirección o sintieron que algo los hiciera cambiar de dirección.

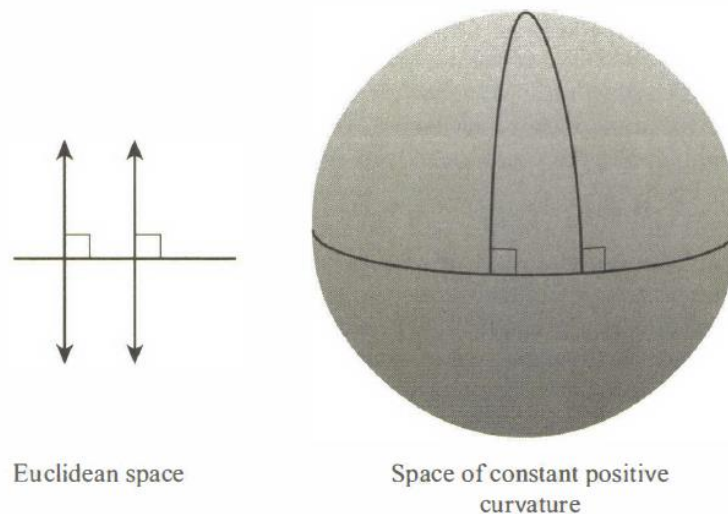


Figura 5.4.- Rectas paralelas en una geometría de Euclides (izquierda) y en geometría de curvatura positiva (derecha). Imagen tomada de Maudlin (2012:130).

De manera que ambos personajes concluyen que realmente no siguieron rectas paralelas, sino que alguna entidad misteriosa los sacó de su trayectoria. Dicha entidad, sea lo que sea, los sacó de un movimiento rectilíneo uniforme, por lo que debió ser algún tipo de fuerza que los atraía. Si suponemos, además, que su espacio no fuera una esfera perfecta todo el tiempo, sino que su curvatura cambiara con la masa de los personajes, de manera que si adelgazan su mundo se hiciera más plano y si engordan su mundo se curvara más, entonces, ellos, después de repetir la situación bajo dichos cambios, pensarían que hay una fuerza que los atrae y que es directamente proporcional a su masa. Es decir, estarían llegando a algo muy parecido a la gravitación newtoniana. Sin embargo, esto sería una ilusión puesto que no hay ninguna fuerza o entidad misteriosa, todo es un efecto de la curvatura de su mundo de la que no están conscientes. La investigación de Einstein lo llevaría a concluir que éste era el caso de lo que conocemos como

gravedad. Así, uno puede explicar la gravedad considerando que el tensor de energía-momento (que contiene la distribución de la masa y energía en un caso dado) debía conectarse con el tensor métrico de tal manera que las ecuaciones de campo serían igualdades tales que de un lado tuvieran componentes del tensor de energía-momento (de la distribución de materia) y del otro lado componentes relacionadas al tensor métrico (la geometría). Con esto, la gravedad deja de ser una entidad misteriosa y la caída de los cuerpos deja de ser un efecto de atracción para convertirse en una trayectoria a lo largo de una geodésica. La generalización de la expresión 5.4 a 5.5 le indicaba a Einstein que los efectos de la gravedad se podían caracterizar a partir del tensor métrico. Con todo, la idea de que la gravedad es un efecto de la curvatura sólo apareció, explícitamente, hasta Einstein y Fokker (1914/1987). Antes había que encontrar la manera correcta de integrar la geometría con la distribución de materia y energía, lo cual probaría ser más difícil de lo que podría pensarse.

5.2- Los principios físicos que guiaron a Einstein y las estrategias en la búsqueda de las ecuaciones de campo

Cuando Einstein inició su búsqueda de las ecuaciones de campo en 1912 mediante el uso de las geometrías no euclidianas, él había logrado identificar cuatro principios físicos que servirían como guía. Es decir, había cuatro requisitos que guiarían la investigación de Einstein los siguientes años, estos eran: **i)** el principio de equivalencia identificado desde 1907, **ii)** el principio de relatividad generalizado (además de que las leyes de la física debían ser las mismas para todos los observadores con velocidades inerciales, ahora, Einstein requería que también la física fuera la misma para todos los observadores tanto en sistemas inerciales como en sistemas acelerados. Si se cumplía este requisito se cumpliría automáticamente el anterior, pero, como veremos, aunque este principio de relatividad generalizada juega un importante papel heurístico, al final, Einstein sólo logra cumplir satisfactoriamente con el anterior.), **iii)** Einstein esperaba que sus conclusiones no violaran principios de conservación de energía y momento, y **iv)** el principio de correspondencia (dado que la gravitación newtoniana da cuenta de la mayor parte de los movimiento de los cuerpos celestes, una nueva explicación de la gravedad debía corresponder, al menos aproximadamente, con los resultados de la gravitación newtoniana). Estos principios podían funcionar, alternativamente, tanto como bloques constitutivos como criterios para aceptar o rechazar posibles soluciones. El camino a seguir era, entonces, buscar un modelo matemático que capturara adecuadamente los principios i) a iv). Para lograr esto, Einstein parece haber explorado diferentes procedimientos. “Dos estrategias pueden discernirse en esta búsqueda. Las hemos llamado la ‘estrategia matemática’ y la ‘estrategia física’.” (Janssen, Norton, Renn, Sauer y Stachel, 2007:10). En particular, Renn y Sauer (2007:151-152) describen las estrategias del siguiente modo (figura 5.5).

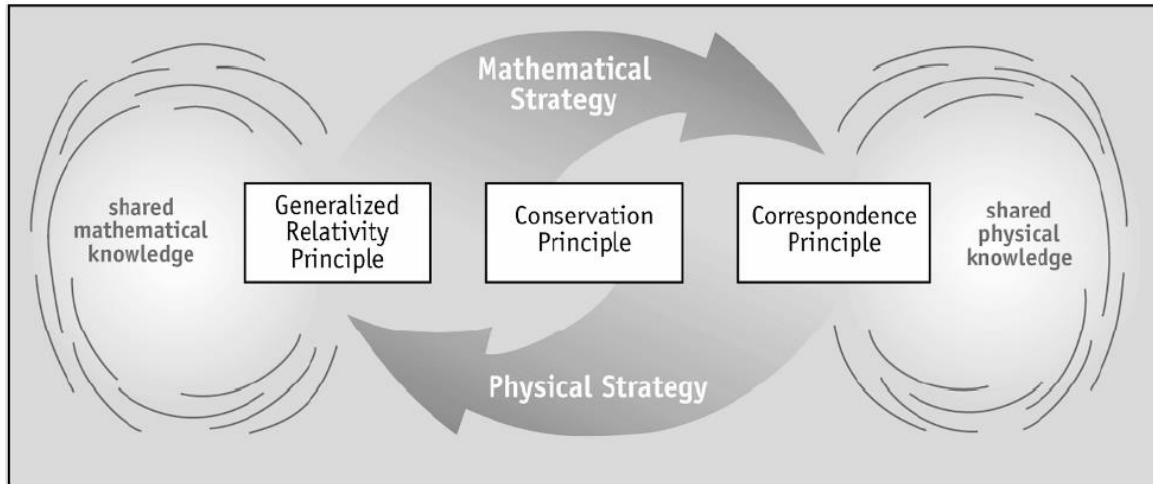


Figura 5.5- La doble estrategia de Einstein en la búsqueda de las ecuaciones de campo. Imagen tomada de Renn y Sauer 2007:152. Nótese que estas estrategias pueden ser entendidas como una instancia, en el caso concreto de Einstein, de la relación entre modelos y principios físicos del esquema de la figura 4.2

La ‘estrategia física’ comenzaría con la física clásica, para ello habría que seleccionar ecuaciones de campo construidas de tal forma que rescataran el límite newtoniano, es decir, que a primera aproximación llevaran a los mismos resultados que la física clásica. Dado que la estrategia consiste en partir de la física conocida, el segundo paso sería revisar que las ecuaciones seleccionadas no violaran principios de conservación. Esto podría sugerir modificaciones o comenzar de nuevo. Finalmente, si se encontraba algunas ecuaciones de campo que sobrevivieran estas pruebas, habría que explorar bajo qué casos cumplen el principio de relatividad generalizado, es decir, bajo qué transformaciones de coordenadas retienen su forma matemática. Si no lo eran en todos los casos se esperaría que al menos cumplieran con el principio de equivalencia o, en otras palabras, que mantuvieran su forma matemática al transformar coordenadas de sistemas linealmente acelerados a sistemas en movimiento rotacionalmente acelerado. Otra forma de proceder sería seguir la ‘estrategia matemática’, ésta comenzaría de manera inversa, primero habría que seleccionar ecuaciones que fueran covariantes (que mantuvieran su forma bajo transformaciones de coordenadas), los estudios previos que otros matemáticos habían llevado a cabo en geometrías no euclidianas podían proveer candidatos. Sin embargo, en este caso, el significado físico que dichas ecuaciones pudieran tener sería menos obvio. De manera que ahora habría que revisar que no hubiera dificultades en relación a los principios de conservación y que fuera posible recuperar el límite newtoniano. A diferencia de la estrategia física, en la que el requerimiento final podía debilitarse de manera que las ecuaciones sólo tuvieran que ser covariantes al cambiar de sistemas linealmente acelerados a circular uniformemente acelerados, en la estrategia matemática los requerimientos conservación y correspondencia no se podían debilitar por lo que imponían restricciones más fuertes. Adicionalmente, Renn y Sauer consideran que Einstein trataba de dar una explicación de la

gravedad que fuera análoga a la manera en que Lorentz había explicado la electrodinámica, es decir, como la interacción de los objetos a través de un campo en vez de mediadas por una acción a distancia. Estos procedimientos fueron guiados por la búsqueda de integrar los modelos matemáticos con los principios físicos. “Las dos estrategias no actuaban como algoritmos para producir soluciones, más bien como diferentes canales para llenar el modelo de Lorentz con contenido matemático y físico concreto” (Renn y Sauer, 2007:153).

5.3- El artículo *Entwurf* y el primer resultado inadecuado en la búsqueda de las ecuaciones de campo.

El primer resultado relevante de esta búsqueda fueron las ecuaciones de campo presentadas en un artículo titulado *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation* (Outline of a Generalized Theory of Relativity and of a Theory of Gravitation) del que Einstein y Grossmann aparecían como autores y que fue publicado a mediados de 1913. Comúnmente se suele referir a este artículo simplemente como el artículo *Entwurf*. Al inicio de dicho artículo uno puede reconocer algunos elementos modernos: podemos encontrar el uso del tensor métrico y se presenta la acción de la gravedad, en algunos procesos, con ecuaciones covariantes. Aquí los sistemas de coordenadas, más que mediciones de distancia y tiempo, son componentes del elemento de línea invariante. Las mediciones de distancia y tiempo se pueden llevar a cabo, localmente, por los mismos métodos que en la relatividad especial, pero la distancia natural correspondiente sólo se puede determinar cuando el tensor métrico que define el campo gravitacional es conocido. Sin embargo, las ecuaciones de campo que Einstein y Grossmann presentaron sólo son covariantes en un sentido restringido. Son ecuaciones que no mantienen su forma matemática bajo cambios de coordenadas que no sean lineales. En pocas palabras “*El artículo Einstein-Grossmann, publicado en 1913, contiene profundas intuiciones sobre la naturaleza de la medición, algunas ecuaciones relativistas generalmente covariantes, algunos razonamientos erróneos, y una notación oscura*” (Pais, 1982/2005:216, énfasis mío).

Lo extraño del asunto es que Einstein parece haber llegado a una solución que sí era covariante bajo transformaciones de coordenadas en general mediante el uso de una contracción del tensor de curvatura de Riemann conocida, hoy en día, como tensor de Ricci. Esta sería la solución que Einstein presentaría en 1915 y que es prácticamente la solución moderna. Al parecer, Einstein inició su investigación siguiendo la ‘estrategia matemática’; escogió una expresión matemática que era covariante en general, el mencionado tensor de Ricci, y luego procedió a revisar que cumpliera principios de conservación y correspondencia, pero pensó que las ecuaciones de campo covariantes, las del tensor de Ricci, no permitían rescatar el límite newtoniano de manera adecuada por lo que las rechazó y busco una versión restringida, mediante la ‘estrategia física’, que es la que aparece en su artículo con Grossmann de 1913. Sin embargo, la idea de que el tensor de Ricci no funciona es incorrecta, las ecuaciones de 1915, basadas en dicho tensor, sí recuperan el límite newtoniano. Unos meses después, Einstein agregó que las ecuaciones de campo no podían ser generalmente covariantes sin entrar en conflicto con el principio de

conservación, lo que de nuevo es incorrecto⁴⁰. Con todo, las razones que llevaron a Einstein rechazar el tensor de Ricci, no están muy claras. Tradicionalmente se ha dicho (por ejemplo Pais 1982/2005:221-223) que la confusión se debió a que Einstein pasó por alto que, como las ecuaciones basadas en el tensor de Ricci son covariantes mientras que las ecuaciones de la gravedad newtoniana no lo son, no se pueden comparar directamente. Si uno quiere compararlas es necesario imponer restricciones a las ecuaciones de campo de manera que se reduzcan a una forma que sólo sea válida en un marco de referencia y entonces se puede ver si se pueden reducir a una forma congruente con la física de Newton, es decir, sólo imponiendo restricciones a las ecuaciones de campo se puede verificar si se cumple el principio de correspondencia. Sin embargo, esta explicación no parece adecuada. De acuerdo con Norton (1984), parece que Einstein estaba al tanto de la posibilidad de imponer restricciones a las ecuaciones de campo: “La evidencia para esto está contenida primariamente en un cuaderno de Einstein de este periodo y es, yo creo, irrefutable” (Norton 1984:254). Desde la publicación de dicho cuaderno⁴¹, parece necesario dar otra explicación. La que propone el mismo Norton (1984) es que Einstein pensó que podía llevar a cabo la comparación entre sus resultados y el límite newtoniano utilizando el caso de los campos gravitacionales estáticos. Tanto dicho caso de campos estáticos como el de campos débiles llevan a una reducción de las componentes del potencial gravitacional. Einstein habría rechazado el tensor de Ricci debido a que la reducción del potencial, en estos casos, no se comportaba como él esperaba, en particular, pensaba que las tres componentes espaciales del campo estático se comportarían de acuerdo a la geometría euclidiana. “Con esto, Grossmann y Einstein abandonaron la cuestión de construir ecuaciones de campo generalmente covariantes a partir del tensor de Riemann y, aparentemente, de cualquier expresión de segundo orden en las derivadas del tensor métrico. Esto fue una catástrofe.” (Norton 1984:263). Al abandonar el uso del tensor de Riemann, inadvertidamente, abandonaron el camino de la solución moderna. Sin embargo, Janssen y Renn (2007) consideran una explicación diferente en la que el error se debería a que el uso que hace Einstein de las condiciones bajo las que se reduce el potencial gravitacional difiere del moderno y que dicho uso es lo que impulso la investigación en la dirección equivocada. Al parecer no hay un consenso completo entre los historiadores acerca de la fuente de este error⁴², pero le tomaría a Einstein hasta finales de 1915 regresar al tensor de Ricci como base para las ecuaciones de campo.

⁴⁰ Posiblemente esto se debió a que Einstein desconocía lo que modernamente se conoce como identidades de Bianchi, un resultado que fácilmente hubiera permitido ver si las ecuaciones cumplían o no con el principio de conservación.

⁴¹ Se le refiere como ‘*Zürich notebook*’ y se le había catalogado originalmente como notas de las conferencias de Einstein del periodo 1909-1911. Sin embargo, en realidad contiene los cálculos personales de Einstein hasta la publicación del artículo Entwurf por lo que ha brindado la oportunidad de reevaluar las hipótesis acerca de lo que llevó a Einstein a rechazar el uso del tensor de Ricci y a creer que debía restringir la covarianza de las ecuaciones de campo. Con todo, la mayor parte de lo que está escrito en dicho cuaderno son cálculos que no están acompañados por texto por lo que, aunque la mayor parte se puede descifrar, difícilmente lleva a conclusiones incontrovertibles.

⁴² En la introducción de una compilación dedicada a los estudios del origen de la relatividad general los autores reconocen que no pudieron llegar a un consenso sobre cuál fue el error que desvió a Einstein de las ecuaciones de campo: “Este desacuerdo es uno de un número de disputas que no se han resuelto para cuando estos tres volúmenes van a prensa. No nos disculpamos por esto. Es un signo de vitalidad de la erudición en Einstein” (Janssen, Norton, Renn, Sauer y Stachel, 2007:13).

5.4- Profundizando en el error. El argumento del agujero como defensa de las ecuaciones de campo no covariantes de Entwurf

Aproximadamente para finales de 1913, Einstein estaba tan convencido de las conclusiones alcanzadas en el artículo Entwurf que ideó un argumento para establecer que las ecuaciones de dicho artículo eran lo más covariantes que podían ser, es decir, que no era posible encontrar ecuaciones del campo gravitacional generalmente covariantes. A este argumento se le conoce como argumento del agujero y apareció publicado por primera vez en 1914. “Ecuaciones de campo generalmente covariantes, el argumento debía mostrar, no pueden hacer el trabajo básico de determinar unívocamente la geometría del espacio tiempo una vez que la distribución de materia se ha especificado” (Janssen 2014:188-189). La idea era la siguiente⁴³: Considérese un caso en el que se presenta un espacio en el que hay una distribución uniforme de materia excepto en una región, dicha región es el agujero que da nombre al argumento. Ahora, consideremos dos sistemas de coordenadas en dicha región (figura 5.6).

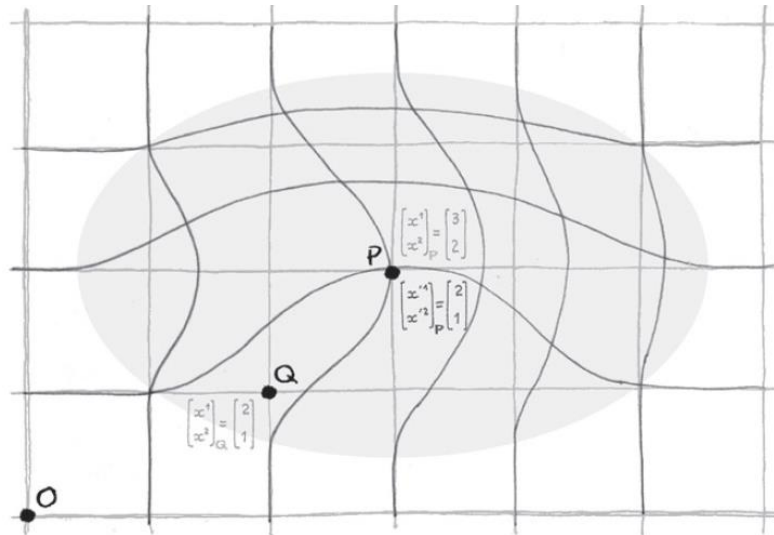


Figura 5.6- El argumento del agujero considera una distribución uniforme de materia con un agujero que carece de materia y dos sistemas de coordenadas en dicha región. Imagen tomada de Janssen (2014:189).

Cualquier función que determine la distribución de materia coincidirá en ambos marcos de referencia, ya que fuera del agujero coinciden y dentro tienen el valor de cero. De manera que una solución de unas ecuaciones de campo generalmente covariantes $g(x)$ que nos da la descripción de la geometría en un punto, tendrá que coincidir con la solución $g'(x')$ que da la geometría en el mismo punto, pero respecto del otro sistema de coordenadas. Por ejemplo, en la figura 5.6 el punto P tiene coordenadas (3,2) en el sistema rígido y (2,1) en el curvo. La solución $g(x)$ da la geometría que tiene el punto (3,2) en el sistema rígido, mientras que la solución $g'(x')$ da la geometría para el punto (2,1) en el sistema curvo. Dado que en ambos casos se trata del

⁴³ A continuación sigo la reconstrucción de Janssen (2007:188-191).

punto P las soluciones $g(x)$ y $g'(x')$ describen la misma geometría. Sin embargo, si las ecuaciones fueran covariantes entonces una solución tendría que seguir siéndolo aunque uno cambie de coordenadas. La solución $g'(x)$ da la geometría de P para el punto Q con respecto al sistema rígido. Por lo tanto $g(x)$ y $g'(x')$ sí parecen asignar geometrías diferentes al mismo punto. Por lo tanto las ecuaciones no podrían determinar la geometría dentro del agujero por lo que los cambios de coordenadas que mantengan la forma de las ecuaciones deben ser restringidos. Así, Einstein justifica el hecho de que sus ecuaciones de 1913 no sean generalmente covariantes. Tiempo después, Einstein batallaría para responder a este mismo argumento cuando descubrió, en 1915, que sí había ecuaciones de campo gravitacional generalmente covariantes que cumplieran con los principios de correspondencia y de conservación⁴⁴.

5.5- Regreso a las ecuaciones de campo covariantes. Solución.

Hasta aquí, hemos visto que, siguiendo la ‘estrategia matemática’, Einstein llegó a las ecuaciones de campo, pero las descartó en 1913 porque pensó que no cumplían con el requisito de recuperar el límite newtoniano, debido a esto él modificó su solución presentando ecuaciones de campo que sólo eran covariantes en casos específicos. Renn y Janssen (2007) afirman que fue la ‘estrategia física’ la que lo llevó de vuelta, en 1915, a las ecuaciones de campo rechazadas en 1913. Dado que esta estrategia partía de los principios de correspondencia y de conservación, ya no había duda de que las ecuaciones, de hecho, sí cumplían con los requisitos heurísticos de Einstein. “Con dos rutas llevando a las mismas ecuaciones de campo, Einstein tenía un lujo de opciones para escoger cómo presentarlas a la academia de Berlín. Escogió las consideraciones matemáticas, que él convirtió en un argumento simple y efectivo para sus nuevas ecuaciones.” (Renn y Janssen 2007:840-841).

Con todo, el camino de regreso a estas ecuaciones fue largo y tortuoso para Einstein. Convencido de que sus ecuaciones de 1913 eran la solución adecuada al problema de la gravitación, Einstein descubrió que el principio de conservación requería un conjunto de condiciones adicionales que, él pensaba, mostrarían la necesidad de las ecuaciones de Entwurf. Al parecer fue hasta octubre de 1915, que Einstein se dio cuenta de que dichos requerimientos no apoyaban a sus ecuaciones de Entwurf de manera unívoca, pero además, se dio cuenta de que, de hecho, Entwurf entraba en conflicto con el principio de equivalencia, ya que las ecuaciones no eran invariantes ante transformaciones de coordenadas en sistemas en movimiento circular. A estas dificultades habría que agregar que los intentos de Einstein por dar cuenta de un efecto de corrimiento del perihelio de mercurio, a partir de Entwurf, habían sido infructuosos. Dicho efecto había sido descubierto por el astrónomo Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) en 1859 y Einstein esperaba poder explicarlo con sus ecuaciones de campo gravitacional. También hay que mencionar que “En marzo, abril y principios de mayo, [Einstein] defendió su teoría con entusiasmo en una intensa correspondencia con Levi-Civita, quien había desafiado la derivación

⁴⁴ Einstein trató, posteriormente, de dar un contraargumento conocido como punto de coincidencia. En épocas más recientes el argumento del agujero fue revivido, con una formulación ligeramente distinta, como objeción contra la idea de sustancialidad del espacio (Véase Norton 2015).

de Einstein de las propiedades covariantes de su tensor gravitacional. Pero parece que para mediados de julio él estaba menos seguro” (Norton 1984:298). En suma, para mediados de octubre las insatisfacciones de Einstein con Entwurf habían llegado a un punto en que ya no era posible ignorarlas. “Esto pronto culminó en algunas de las más agitadas y estruendosas semanas de su vida, en las que las ecuaciones de campo gravitacional generalmente covariantes fueron descubiertas, o quizá, redescubiertas” (Norton 1984:299). Ahora, esto no significa que el tiempo que Einstein pasó explorando las consecuencias de Entwurf fuera un desperdicio, el camino de regreso a las ecuaciones de campo descartadas en su cuaderno de Zúrich fue posible gracias a esas mismas exploraciones. Por ejemplo, las condiciones extra que el principio de conservación requería le hicieron percatarse de que si dichas condiciones aplicaran para todos los cambios de marcos de referencia, el tensor gravitacional tendría que ser el de Ricci.

Finalmente, Einstein (1915a/1987) presentó sus ecuaciones de campo a la academia prusiana el 4 de noviembre de 1915:

$$R_{\mu\nu} = -kT_{\mu\nu} \quad (5.7)$$

El lado izquierdo es el famoso tensor de Ricci, el lado derecho muestra una constante k y T el tensor de energía-momento. El tensor de Ricci es una contracción del tensor de curvatura de Riemann, en otras palabras representa la geometría del espacio-tiempo mientras que el tensor de energía-momento expresa la distribución de materia y, dado que Einstein había integrado los conceptos de energía y materia, también da la distribución de energía. Así, tomando en cuenta las consideraciones de la sección 5.1, la gravedad es una consecuencia de esta relación. Con todo, Einstein (1915c/1987) aun introdujo una modificación que no cambiaba el desarrollo matemático, pero que por fin hacía que las ecuaciones fueran generalmente covariantes:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = -kT_{\mu\nu} \quad (5.8)$$

Al lado izquierdo de la ecuación, en conjunto, se le conoce hoy en día como tensor de Einstein. Estas ecuaciones mantienen su forma bajo cambios de coordenadas en general e implican el principio de conservación sin hipótesis adicionales⁴⁵. Pero “Lo que parece haber catalizado está comprensión fueron sus cálculos de la órbita de mercurio. Él regresó a esta tarea inmediatamente después de haber llegado a las ecuaciones de campo modificadas y fue capaz de presentar sus resultados a la academia prusiana sólo una semana después, el 18 de noviembre” (Norton 1984:310). La solución al movimiento de mercurio, sin necesidad de hipótesis adicionales, reforzó la confianza de Einstein en sus nuevas conclusiones “El descubrimiento fue, yo creo, por

⁴⁵ Posiblemente lo único que no hace completamente satisfactoria a esta solución, desde el punto de vista de las expectativas de Einstein, es que, aunque sí elimina localmente la distinción entre sistemas de referencia acelerados reivindicando el principio de equivalencia, no elimina la distinción entre sistemas inerciales y sistemas acelerados por lo que, al final, no reivindica completamente a Mach y, aun hoy en día, la sustancialidad del espacio puede ser tema de debate en la filosofía de la física.

mucho la experiencia emocional más fuerte en la vida científica de Einstein, posiblemente de toda su vida.” (Pais, 1982/2005:253).

6.- Corroboración observacional con el eclipse de 1919

Con todo, lo que finalmente establecería a la relatividad general como una explicación exitosa de la gravedad y convertiría a Einstein en el primer científico mundialmente famoso fue la corroboración observacional de que la luz podía ser afectada en su trayectoria por campos gravitacionales. Como hemos visto, esta idea estaba presente desde 1907 y era consecuencia del principio de equivalencia, sin embargo, en aquel momento él había pensado que el efecto sería demasiado pequeño como para que pudiera medirse. Poco después, en 1911, Einstein calculó que la desviación en la luz de una estrella en un eclipse sería de $0''.87$ segundos de arco. Pero en 1915 concluyó, ahora tomando en cuenta la curvatura del espacio-tiempo, que la desviación sería de $1''.17$. Esto estaba dentro de lo que se podía medir en la época, pero pocos astrónomos tomaron interés en el tema. Sin embargo, para 1911 Einstein había iniciado una correspondencia con el astrónomo Erwin Freundlich (1885-1964).

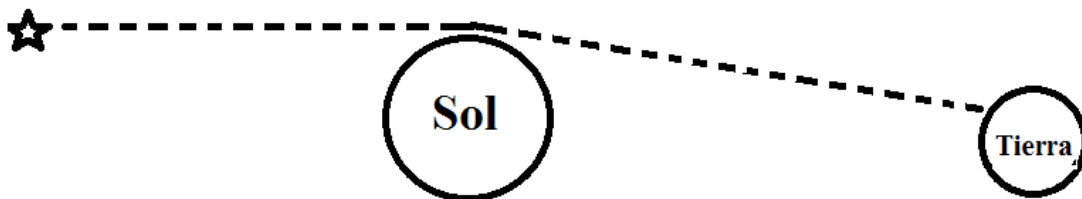


Figura 5.7- Desviación de la luz de una estrella debido al campo gravitacional del sol.

El efecto sólo se produciría en estrellas que tuvieran una posición aparente cercana al sol, pero el mismo sol es tan brillante que impide ver cualquiera de éstas por lo que es necesario esperar a un eclipse y tomar fotografías de las estrellas, si las estrellas aparentaban haberse movido de su posición la distancia predicha por la relatividad general, significaría que, en efecto, la luz es afectada de acuerdo con el principio de equivalencia y la curvatura del espacio tiempo. Sin embargo, los eclipses de sol ocurren en pocas ocasiones y, por lo general, sólo son visibles en regiones específicas por lo que se requerían costosas expediciones para observar el efecto, de manera que la idea inicial de Freundlich fue revisar placas fotográficas de eclipses pasados. “Resultó que todas las placas disponibles en Postdam eran completamente inadecuadas para este propósito, Freundlich escribió a los centros astronómicos más importantes alrededor del mundo, preguntando por buenas reproducciones de fotografías previas de eclipses solares” (Hentschel 1994:151). Sin embargo, las placas que fue capaz de obtener también resultaron inadecuadas por diferentes razones. De acuerdo con Hentschel (1994), las razones fueron i) pocas placas tenían al sol en el centro, ii) el tiempo de exposición había sido excesivo, iii) los arreglos de la exposición habían considerado el movimiento del sol y no el de las estrellas y iv) no había modo

de saber si las placas se habían contraído debido a cambios de temperatura. Finalmente, Freundlich intentó hacer él mismo una expedición a Crimea para tomar las fotografías necesarias en 1914. Sin embargo, el inicio de la primera guerra mundial impidió el éxito de la expedición. “Freundlich junto con sus colaboradores fue detenido como extranjero en Odessa por muchas semanas bajo las sospechas de espionaje evitando que pudieran usar sus instrumentos de medición” (Hentschel 1994:170-171). Lo que sí logró Freundlich fue llamar la atención de la comunidad de astrónomos acerca de la posibilidad de corroborar la relatividad general mediante fotografías del sol durante un eclipse. Esto permitió motivar otros intentos, aunque también resultaron infructuosos. “Una oportunidad de observar un eclipse en Venezuela en 1916 tuvo que desperdiciarse debido a la guerra... Un esfuerzo americano de medir el efecto durante el eclipse de Junio de 1918 no llevó a resultados conclusivos” (Pais 1982/2005:304).

Durante estos años la relatividad general comenzó a ser conocida en Inglaterra y uno de los primeros astrónomos ingleses en entrar en contacto con ella fue Arthur Stanley Eddington (1882-1944) director del observatorio de Cambridge. En marzo de 1917 el astrónomo real, Sir Frank Watson Dyson señaló que el eclipse del 29 de mayo de 1919 sería ideal para llevar a cabo la prueba ya que el sol estaría cerca del cúmulo estelar Híades lo que facilitaría detectar el desplazamiento si lo había. De manera que los británicos montaron dos expediciones para observar dicho eclipse; una en Sobral Brasil, dirigida por Andrew Crommelin del observatorio de Greenwich, y otra en las islas Príncipe de la costa de la Guinea española dirigida por el propio Eddington. Los resultados se anunciaron hasta noviembre. “De acuerdo a un reporte preliminar de Eddington a la asociación británica celebrada en Bournemouth del 9 al 13 de septiembre, la desviación de la luz estaba entre $0''.87$ y el doble de ese valor. Palabras que llegaron a Lorentz. Lorentz telegrafió a Einstein cuya emoción por recibir estas noticias después de varios años de espera será clara. Después llegó el 6 de noviembre de 1919, el día en que Einstein fue canonizado” (Pais 1982/2005:305).

Se ha dicho que los resultados de Eddington pudieron haber sido influenciados por él mismo⁴⁶ y que era dudosa la precisión de las mediciones realizadas a partir de sus placas. Sin embargo, de acuerdo con la investigación de Kennefick (2012), no parece haber evidencia de que alguna parcialidad de Eddington afectara los resultados “Más aun, hay excelentes fundamentos para creer que la aseveración central de los científicos de la expedición (incluido Eddington), a saber, que los resultados coincidían aproximadamente con las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein y firmemente refutaban el único otro valor teórico predicho (el así llamado resultado ‘newtoniano’), estaba justificada por las observaciones tomadas.” (Kennefick 2012:201-202).

⁴⁶ Al parecer Eddington creía que la expedición confirmaría la relatividad de antemano y, siendo pacifista, esperaba que su expedición inglesa para corroborar una teoría alemana ayudara a reconciliar a científicos de ambos países cuyas relaciones se habían hecho difíciles durante, y después, de la primera guerra mundial.

Esta historia que ha comenzado en el capítulo 1 con observaciones astronómicas, las observaciones de las lunas de Júpiter y la aberración estelar, termina con otra, la de Eddington. Inició con un intento de medir diferencias entre tiempos y determinar distancias, el problema de la longitud terrestre, y termina con una nueva concepción de lo que consideramos espacio y tiempo. En el proceso los intentos por medir las variaciones de la velocidad de la luz permitieron mejorar las nociones de distancias y tiempos generando el concepto de espacio-tiempo definido por operaciones de medición. Dicho concepto, una vez desarrollado y apoyado por nuevas herramientas matemáticas, queda establecido, o atrincherado, por sus resultados, por su eficacia para conectar datos y prever resultados de posibles operaciones nuevas.

Conclusiones generales

La pregunta que intenté responder a lo largo de la presente investigación es *¿Tuvieron algún papel relevante algunas mediciones científicas pre-einsteinianas en el surgimiento del concepto einsteiniano de espacio-tiempo?* Tal como lo mostré, la respuesta es afirmativa aunque muy compleja. Lo que sigue a continuación es el resumen de las siete conclusiones alcanzadas en el presente estudio. Fueron tres las mediciones científicas pre-einsteinianas:

1. Una de las mediciones pre-einsteinianas más importantes fue la medición de la velocidad de la luz. La medición de la velocidad de la luz consistió en el desarrollo de un proceso largo y heterogéneo que comenzó con observaciones astronómicas de los siglos XVII y XVIII realizadas en Europa con instrumentos, tales como el telescopio, que permitieron tomar registros precisos. Estas observaciones generaron la idea de que la luz requiere tiempo para su propagación. El proceso continuó con debates acerca de la naturaleza ondulatoria de la luz y su medio de propagación, para luego desembocar en las mediciones de Arago y Fizeau llevadas a cabo ya con un concepto métrico de velocidad de la luz y con la creación de instrumentos que consistían en arreglos de espejos y lentes. Dichas técnicas culminaron en la invención del interferómetro de Michelson y con la conclusión de que la dirección del movimiento no alteraba los resultados de las mediciones de la velocidad de la luz.
2. Otra medición relevante fue la de unidades electromagnéticas que consistió en un desarrollo de poco menos de un siglo y que comenzó con las observaciones de Hans C. Oersted, durante el siglo XIX. Dichas observaciones mostraron correlaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos, las cuales también fueron investigadas por Ampere, Faraday, Weber y Gauss. Esto generó diferentes instrumentos y métodos de medición. Debido a esto, Weber y Kohlraush utilizaron galvanómetros, electroimanes y circuitos de corriente eléctrica para determinar la relación entre los distintos métodos de medición propuestos. Weber concluyó que la relación entre mediciones electrostáticas y electromagnéticas estaba dada por una constante. Posteriormente, J. C. Maxwell proporcionó un modelo matemático preciso de estas relaciones y concluyó que la constante que Weber había identificado tenía el mismo valor que la velocidad que tendrían hipotéticas ondas electromagnéticas. Finalmente, H. Hertz proporcionó mediciones confiables de dichas ondas electromagnéticas y su velocidad.
3. La tercera medición relevante consistió en determinar distancias entre puntos terrestres distantes. Este caso es diferente a los anteriores puesto que ya había mediciones de tales distancias, la dificultad consistía en aumentar su precisión y confiabilidad. Como hemos visto, éste fue un problema persistente, Galileo Galilei esperaba que las observaciones de las lunas de Júpiter pudieran proveer una solución. Investigadores como, Cassini, Huygens y Römer exploraron esta posibilidad. Posteriormente, otros investigadores utilizaron métodos terrestres, algunos de los cuales hacían uso de fenómenos electromagnéticos, en particular podemos mencionar personajes como Arago, Fizeau, Gauss, Weber, Hertz,

Heaviside, Poincaré y el propio Einstein, entre quienes se interesaron por este asunto. Por razones diferentes este problema fue un constante desafío para los científicos mencionados y ellos respondieron, cada cual, con métodos diferentes.

4. Los resultados de estas tres mediciones tuvieron diferentes roles en dos tiempos diferentes, en 1905 y 1915:

Primer tiempo 1905. Crisis epistémica:

La medición de la velocidad de la luz había encontrado dificultades en la interpretación de los datos que se habían producido hasta finales del siglo XIX. Adicionalmente, el principio de relatividad (que afirma que todos los marcos de referencia inerciales son equivalentes) y el principio de la constancia de la velocidad de la luz habían sido aceptados por Einstein aunque parecían inconsistentes. *Hay explícitamente una inconsistencia entre principios físicos, no se puede aceptar ambos de manera coherente.* Sin embargo, ambos principios estaban apoyados por los resultados de la medición de la velocidad de la luz. En este momento, Einstein resuelve estas tensiones cambiando los principios físicos del espacio y tiempo. Para ello utiliza el principio físico de la realidad física del tiempo local que también estaba apoyado por los resultados de la velocidad de la luz en la interpretación de Einstein. Adicionalmente, esto resuelve otra tensión, percibida por Einstein, entre los datos de la electrodinámica y los principios físicos de la misma. Todo esto lo hace Einstein conservando modelos matemáticos y datos, ya que él no realiza mediciones ni utiliza ecuaciones diferentes a las que existían en ese momento (1905) en la práctica científica. En la reconstrucción de 1905 encontramos una crisis epistémica, ya que Einstein sostiene que necesitamos operaciones experimentales para justificar nuestro concepto de simultaneidad, esto permite integrar el desarrollo de las mediciones previas en una unidad. Durante la misma época, H. Lorentz llegó a una solución diferente. El camino que siguieron Lorentz y Poincaré consistió en conservar datos y principios físicos, incluso el principio del éter con modificaciones menores, y desarrollar un modelo matemático (las transformaciones de Lorentz) que producía resultados correctos eliminando los efectos del éter. Lorentz parte de los mismos datos que Einstein e intenta más bien un cambio cognitivo, es decir, un cambio en los modelos matemáticos más que en los principios físicos o en los datos.

Lo que muestra el caso de Lorentz, Poincaré y Einstein es que había más de una manera de resolver las situaciones, había más de un elemento que se podía modificar. En concreto, había dos líneas de desarrollo. Einstein, a diferencia de Lorentz, hace métrica la justificación de dos principios físicos.

Segundo tiempo 1915. Crisis cognitiva:

La geometría utilizada por Einstein en 1915 generaba un modelo matemático que completamente incorpora los rasgos asociados al principio métrico del espacio-tiempo. Lo cual significaba una crisis cognitiva. Los modelos matemáticos tradicionales, concretamente los basados en geometría euclidiana, no exhibían satisfactoriamente las propiedades matemáticas que los nuevos principios físicos de 1905 implicaban. Esto era

particularmente claro cuando se consideraba el caso de los sistemas de referencia acelerados.

5. Poincaré había argumentado que no era posible escoger entre diferentes sistemas geométricos a partir de datos y que en consecuencia no era posible dicha elección más que por convención. Tiene razón en cuanto a que los datos subdeterminan la elección de geometrías, pero no en cuanto a que no hay otro mecanismo más que la convención para elegir la geometría: A partir de principios físicos. En otras palabras, los nuevos principios físicos (1905) “escogían” o determinaban una geometría específica entre las diferentes geometrías disponibles, y éstas a su vez calculaban datos específicos. Lo cual nos sugiere la necesidad de revisar el convencionalismo filosófico y las tesis de la subdeterminación.
6. Este estudio muestra, como conclusión general, que centrar el análisis filosófico en el desarrollo de las prácticas de medición y sus elementos constitutivos nos permite identificar más claramente cuales elementos a través de la historia de la ciencia, permanecen, cuales cambian y porqué. A diferencia de lo que sucede en estudios centrados en cambios de teorías, paradigmas, programas de investigación etc.
7. Respecto del abandono de principios físicos considero relevante señalar que Einstein no dice que la hipótesis del éter resulte ser falsa, sino que resulta superflua. A pesar de las dificultades que había generado, Lorentz mantiene al éter, entre otras cosas, porque le permite explicar efectos como el coeficiente de arrastre de Fresnel. Por su parte, Einstein puede explicar dichos fenómenos sin el mencionado éter, las funciones que éste tenía son asumidas por otros elementos. En contraste con lo que afirmarían corrientes filosóficas como el falsacionismo de Popper, esto sugiere que el abandono de principios físicos está más relacionado a la pérdida de su carácter operativo, es decir, a la pérdida de su capacidad para conectar datos y generar modelos que superen las dificultades encontradas en el proceso de la indagación, que al hecho de que se presenten contradicciones directas entre dichos principios y la evidencia.

Bibliografía

Arago, D.,F.,J., (1816), Note Sur un Phénomène remarquable qui s'observe dans la diffraction de la lumière, *Annales de Chimie et de Physique*, No.5, pp.199-202

Beckman, J., E., (2012), Observational Tests of General Relativity: An Historical Look at Measurements Prior to the Advent of Modern Space-Borne Instruments, en *Einstein and the Changing Worldviews of Physics*, Christoph Lehner, Jürgen Renn, y Matthias Schemmel, eds., Springer, New York, pp.273-290.

Brace, D., B., (1904), On Double Refraction in Matter moving through the Aether, *Philosophical Magazine*, Vol. 7, No. 40, pp. 317-329

Bradley, J. (1728). A Letter from the Reverent Mr. James Savilian Professor of Astronomy of Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. giving an account of a new discovered motion of the fix'd stars, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 35, pp.637–660.

Burstyn, H., L., (1980), Foucault, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp. 84-87

Canales, J., (2009), *A tenth of a second*, The University of Chicago Press

_____, (2015), *The Physicist & the Philosopher. Einstein, Bergson, and the Debate that Changed our Understanding of Time*, Princeton University Press

Castelvecchi, D., y Witze, W., (2016), “Einstein's gravitational waves found at last”, *Nature News*, Recuperado de <http://www.nature.com/news/einstein-s-gravitational-waves-found-at-last-1.19361> el 13 de Junio de 2016.

Darrigol, O., (1996), The Electrodynamical Origins of Relativity Theory, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 26, pp. 241-312.

_____, (2000), *Electrodynamics from Ampere to Einstein*, Oxford University Press.

_____, (2004), The Mystery of the Einstein–Poincaré Connection, *Isis*, Vol. 95, No. 4, pp. 614-626

_____, (2005), The Genesis of the Theory of Relativity, en *Einstein, 1905-2005 Poincaré Seminar 2005*, Damour, T., Darrigol, O., Duplantier, B., Rivasseau, V., (eds), Birkhäuser Verlag, Basel – Boston – Berlin, pp. 1-30

_____, (2012), *A History of Optics. From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*, Oxford University Press.

Dewey, J., (1929), *The Quest for Certainty: A Study of the Relation of Knowledge and Action*, New York, Minton, Balch & Company

Einstein, A., (1899/1987). To Mileva Maric., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.1, Doc. 52., Princeton University Press

_____, (1901/1987). To Mileva Maric., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.1, Doc. 128., Princeton University Press

_____, (1905/2005), *Sobre la Electrodinámica de Cuerpos en Movimiento*, (Hernando Quevedo, trad.), Recuperado de https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/articulo-original.pdf (Obra original publicada en *Annalen der Physik*, 17, 891-921 (1905).)

_____, (1907/1987). On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn From It., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.2, Doc. 47., Princeton University Press

_____, (1909/1987). To Arnold Sommerfeld., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.5, Doc. 179., Princeton University Press

_____, (1911/1987). On the Influence of Gravitation on the Propagation of Light., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.3, Doc.23., Princeton University Press

_____, (1912a/1987). The Speed of Light and the Statics of the Gravitational Field., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.4, Doc. 3., Princeton University Press

_____, (1912b/1987), On the theory of Static Gravitational Field and Note Added in Proof., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.4, Doc. 4., Princeton University Press

_____, (1912c/1987). To Paul Ehrenfest., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.5, Doc. 409., Princeton University Press

_____, (1913/1987). Outline of a Generalized Theory of Relativity and of a Theory of Gravitation., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.4, Doc. 13., Princeton University Press

_____, (1915a/1987). On the General Theory of Relativity., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.6, Doc. 21., Princeton University Press

_____, (1915b/1987), Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from the General Theory of Relativity., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.6, Doc. 24., Princeton University Press

_____, (1915c/1987). The field Equation of Gravitation., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.6, Doc. 25., Princeton University Press

_____, (1916/1987). Ernst Mach., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.6, Doc. 29., Princeton University Press

_____, (1921/1987). Geometry and Experience., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.7, Doc. 52., Princeton University Press

_____, (1922/1970), *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press

_____, (1922/1982), How I created the theory of relativity?, (de las notas tomadas por Jun Ishiwara de la conferencia de Einstein en Kyoto llevada a cabo el 14 de Diciembre de 1922), *Physics today*, 35: 8 (1982), 45-47.

_____, (1949/2003), *Notas Autobiográficas*, Madrid, Alianza Editorial, Traducción de Miguel Paredes.

_____, (1987), Research Notes on a Generalized Theory of Relativity, en *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vol.4, Doc.10, [También publicadas con el título: Einstein's Zurich Notebook: Transcription and Facsimile, en *The Genesis of General Relativity Vol. 1. Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*, Jürgen Renn ed., (2007), (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer, pp.314-487]

_____, (1987). On the Special and the General Theory of Relativity (A Popular Account)., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.6, Doc. 42., Princeton University Press

Einstein, A., y Fokker, A., D., (1914/1987). Nordström's Theory of Gravitation from the View of the Absolute Differential Calculus., en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English translation supplement)*, Vol.4, Doc. 28., Princeton University Press

Everitt, C.,W.,F.,(1980), Maxwell, en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 9, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp.198-230

Feyerabend, P., K., (1974), Zahar on Einstein, *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 25, No. 1, pp.25-28

Fizeau, H., (1849), Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière, Académie des Sciences, *Comptes-rendus* No.29 pp. 90-92

_____, (1851), Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer quele mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur, Académie des Sciences, *Comptes-rendus*, No.33, 349-355

French, A., P., (1974), *Relatividad Especial*, Traducido por Aguilar Peris, J., Editorial Reverté, S. A. Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas-México.

Fresnel, A., (1818), Lettre de M. Fresnel à M. Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique, *Annales de Chimie et de Physique*, No.3, pp.57-66

Friedman, M., (2014), Space, Time, and Geometry, en *The Cambridge Companion to Einstein*, Michel Janssen y Christoph Lehner eds., Cambridge University Press, pp. 398-420

Galison, P., (2005), *Relojes de Einstein, mapas de Poincare. Imperios del tiempo*, Barcelona, Crítica.

Gouch, J., B., (1980), Fizeau, en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp. 18-21

Grünbaum, A., (1976), Ad Hoc Auxiliary Hypotheses and Falsificationism, *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol.27, No.4, pp.329-362

Guillaumin, G., E., (2016), *Génesis de la Medición Celeste. Una Historia Cognitiva del Crecimiento de la Medición en Astronomía*, Tirant Humanidades México.

Hahn, R., (1980), Arago, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 1, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp. 200-203

Hartley, D., (1749/1966), *Observations on Man*, Gainesville, Florida Scholars' Facsimiles & Reprints

Hentschel, K., (1994), Erwin Finlay Freundlich and Testing Einstein's Theory of Relativity, *Archive for History of Exact Sciences*, Vol.47, No.2, pp.143-201

Hertz, H., (1884/1896), On the Relations Between Maxwell's Fundamental Electromagnetic Equations and the Fundamental Equations of the Opposing Electromagnetics, en *Miscellaneous Papers by Heinrich Hertz*, Lenerd, P., ed. Traducción al inglés por Jones, D., E., y Schott, G., A., Macmillan & Co, pp. 273-290

_____, (1885) On the Dimensions of Magnetic Pole in Different Systems of Units, en *Miscellaneous Papers by Heinrich Hertz*, Lenerd, P., ed. Traducción al inglés por Jones, D., E., y Schott, G., A., Macmillan & Co, pp. 291-295

_____, (1889), On the Relations between Light and Electricity, en *Miscellaneous Papers by Heinrich Hertz*, Lenerd, P., ed. Traducción al inglés por Jones, D., E., y Schott, G., A., Macmillan & Co, pp. 313-327

_____, (1893) *Electric Waves*, Traducción al inglés por Jones, D., E., Macmillan & Co.

Holton, G., (1969), Einstein, Michelson, and the "Crucial" Experiment, *Isis*, Vol. 60, No. 2, pp. 132-197

Hon, G., y Goldstein, B., (2005), How Einstein Made Asymmetry Disappear; Symmetry and Relativity in 1905, *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 59, No. 5 (July 2005), pp. 437-544

Hume, D., (2001), *Tratado de la naturaleza humana*, La traducción del inglés por Vicente Viqueira, Servicio de Publicaciones. Diputación de Albacete. Libros en la Red

Hunt, B., J., (2002), Electrical Theory and Practice in the nineteenth Century, en *The Cambridge History of Science. Vol. 5 The Modern Physical and Mathematical Sciences*, Nye, M., J., ed, Cambridge University Press, pp. 311-330

Hunt, C., (2012), On Ad Hoc Hypotheses, *Philosophy of Science*, Vol. 79, No. 1, pp. 1-14

Huygens, C., (1690), *Treatise on Light*, Recuperado de https://www.stmarys-ca.edu/sites/default/files/attachments/files/Treatise_on_Light.pdf

Jammer, M., (1993), *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics.*, Dover Publications INC. New York

Janssen, M, Norton, J., D., Renn, J., Sauer, T., y Stachel, J., (2007), Introduction to Volumes 1 And 2: The Zurich Notebook and the Genesis of General Relativity, en *The Genesis of General Relativity Vol. 1. Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*, Jürgen Renn ed., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer pp.7-20

Janssen, M., (2002), Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Einstein versus Lorentz, *Physics in Perspective*, Vol.4, No.4, pp. 421-446

_____, (2014), "No Success Like Failure . . ." Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920, en *The Cambridge Companion to Einstein*, Michel Janssen y Christoph Lehner eds., Cambridge University Press, pp. 167-227

Janssen, M., y Renn, J., (2007), Untying The Knot: How Einstein Found His Way Back To Field Equations Discarded In The Zurich Notebook, en *The Genesis of General Relativity Vol. 2*, Jürgen Renn ed., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer pp.839-926.

Katzir, S., (2005), Poincaré's Relativistic Physics: Its Origins and Nature, *Physics in Perspective*, Vol.7, pp. 268-292

Kennefick, D., (2012), Not Only Because of Theory: Dyson, Eddington, and the Competing Myths of the 1919 Eclipse Expedition, en *Einstein and the Changing Worldviews of Physics*, Christoph Lehner, Jürgen Renn, y Matthias Schemmel, eds., Springer, New York, pp.201-231.

Laudan, L., (1981), *Science and Hypothesis. Historical essays on scientific methodology*, Springer.

Laugine, P., (2012), How did Light Acquire a Velocity?, *Science and Education*, Vol.22, No.6, Springer, pp. 1537-1554

Lorentz, H., A., (1886), De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux, *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, T. XXI, pp.7-176

_____, (1892), La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, T. XXV, pp.1-190

_____, (1895a), Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies, Traducción de *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Recuperado de <https://archive.org/details/Lorentz>

_____, (1895b), Michelson's interference experiment, en *The Principle of Relativity*, Sommerfeld. A., (ed), Dover Publications INC. pp.3-8

_____, (1899), Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems, *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, pp.427-442

_____, (1901), *The Scientific Correspondence of H.A. Lorentz. Volume I*, L. Berggren, J.Z. Buchwald, J. Lützen, (eds), Springer

_____, (1904/1952), Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less Than That of Light, en *The Principle of Relativity*, Sommerfeld. A., (ed), Dover Publications INC. pp.9-34

_____, (1904/1952), Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less Than That of Light, en *The Principle of Relativity*, Sommerfeld. A., (ed), Dover Publications INC. pp.9-34

Mach, E., (1949), *Desarrollo Histórico-Critico de la Mecánica*, Espasa-Calpe Argentina, S. A.

Marquina, J., E., (2006), *La Tradición de Investigación Newtoniana*, Biblioteca de Signos, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Maudlin, T., (2012), *Philosophy of Physics. Space and Time*, Princeton University Press Princeton and Oxford

Maxwell, J., C., (1881), *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol.II, Clarendon Press.

May, K., O., (1980), Gauss, Carl Friedrich, en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp. 298-315

McCormmach, R., (1980a), Hertz, en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 6, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp. 340-350

_____, (1980b), Lorentz, en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 8, Gillispie, C.,C.,(ed), Simon & Schuster Macmillan, New York, pp.487-500

Michelson, A., (1927/1995), *Studies in Optics*, Dover Publications INC.

_____, (1881), The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether, *American Journal of Science*, Vol.22, pp.120-129

Michelson, A., A., y E., W., Morley (1886), Influence of the motion of the medium on the velocity of light, *American Journal of Science*, Vol.31, pp.377-386

_____, (1887), On the relative motion of the earth and the luminiferous ether, *American journal of science*, Vol. 34, pp. 333-345.

Norton, J., D., (1984), How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915, *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 14, No. 2, pp. 253-316.

_____, (2004), Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics Prior to 1905, *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 59, No. 1, pp. 45-105

_____, "The Hole Argument", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2015 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2015/entries/spacetime-holearg/>>.

_____, (2010), How Hume and Mach Helped Einstein Find Special Relativity, en *Discourse on a New Method. Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science*, Domski, M., Dickson, M., eds, pp.359-386

Pais, A., (1982/2005), 'Subtle is the Lord...' *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press

Poincaré, H., (1898/1913), The Measure of Time, en *The Foundations of Science (The Value of Science)*, Traducción de George Bruce Halsted, New York: Science Press, pp. 222-234

_____, (1900), The Theory of Lorentz And The Principle of Reaction, *Archives neerlandaises des Sciences exactes et naturelles*, series 2, Vol.5, pp 252-278

_____, (1905), *Science and Hypothesis*, The Walter Scott Publishing Co., New York

_____, (1906/2007) On the Dynamics of electron, Traducido al inglés por Scott Walter del Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo 21, 1906, 129–176. En J. Renn (ed.), *The Genesis of General Relativity Vol. 3: Theories of Gravitation in the Twilight of Classical Physics; Part I (Boston Studies in the Philosophy of Science 201)*. Springer

Popper, K., (2005), *The logic of Discovery*, Taylor & Francis e-Library

Rayleigh, (1902), Does Motion through the Aether cause Double Refraction?, *Philosophical Magazine*, Vol. 4, pp. 678-683

Renn, J., (2007a), Classical Physics in Disarray. The Emergence of the Riddle of Gravitation, en *The Genesis of General Relativity Vol. 1. Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*, Jürgen Renn ed., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer, pp.21-80

_____, (2007b), The Summit Almost Scaled: Max Abraham as a Pioneer of a Relativistic Theory of Gravitation, en *The Genesis of General Relativity Vol. 3. Gravitation In The Twilight And Astronomy Between Mechanics, Field Theory, Of Classical Physics*, Jürgen Renn y Matthias Schemmel eds., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer, pp.305-330

Resnick, R., y Halliday, D., (1999), *Física*, Vol.2, Compañía Editorial Continental

Stachel, J., (1980), Einstein and the Rigidly Rotating Disk, en *General Relativity and Gravitation. One Hundred Years After the Birth of Albert Einstein Volume 1*, A. Held (ed), Plenum Press, New York, pp.1-16

Renn J., y Sauer, T., (2007) Pathways Out of Classical Physics: Einstein's Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equation, en *The Genesis of General Relativity Vol. 1. Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*, Jürgen Renn ed., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer, pp.21-80

Stachel, J., (2007), The first two acts, en *The Genesis of General Relativity Vol. 1. Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*, Jürgen Renn ed., (Boston Studies in the Philosophy of Science 250), Springer pp.81-112

Staley, R., (2002), Travelling light, en *Instruments, Travel and Science Itineraries of precision from the seventeenth to the twentieth century*, Marie-Noëlle Bourguet, Christian Licoppe and H. Otto Sibum eds., Routledge, pp. 243-272

Standage, T., (1998), *The Victorian Internet: the remarkable story of the telegraph and the nineteenth century's on-line pioneers*, Walker Publishing Company, Inc.

Stanford, Kyle, Underdetermination of Scientific Theory, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), forthcoming URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/scientific-underdetermination/>>.

Stokes, G., G., (1846), On Fresnel's Theory of the Aberration of Light, en *Mathematical and Physical Papers by George Gabriel Stokes*, Clay, C., J., ed 2009, vol.1, Cambridge University Press, pp.141-147

Torretti, Roberto, "Nineteenth Century Geometry", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/geometry-19th/>.

Trouton, F., T., y Noble, , H., R., (1903), The Forces Acting on a Charged Condenser moving through Space, *Philosophical transactions of the Royal Society London*, Vol.72 (479), pp. 132-133

Walter, I., (2015), How Einstein Reinvented Reality, *Scientific American*, Sep2015, Vol. 313 Issue 3, pp.38-45

Walter, S., (1999), The non-Euclidean style of Minkowski relativity, en *The Symbolic Universe. Geometry and Physics 1890-1930.*, Jeremy Gray ed. Oxford University Press pp.91-127

Weber, W., y Kohlrausch, R., (1856), On the Amount of Electricity which Flows through the Cross-Section of the Circuit in Galvanic Currents, Translated by S., P., Johnson and ed by L., Hech, recuperado de <http://ppp.unipv.it/Collana/Pages/Libri/Saggi/Volta%20and%20the%20History%20of%20Electricity/V%26H%20Sect3/V%26H%20287-297.pdf> pp.287-297

Wilson, D., B., (1972), George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and the Luminiferous Ether, *The British Journal for the History of Science*, Vol. 6, No. 1 pp. 57-72

Wittaker, E., T., (1953), *A History of the Theories of Aether and Electricity. The Modern Theories 1900-1926*, Thomas Nelson and Sons Ltd.

Zahar, E., (1973a), Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (I), *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 95-123

_____, (1973b), Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II), *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 24, No. 3, pp. 223-262